



Universidad Politécnica de Madrid



Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y
Cartografía

Titulación de Grado en Ingeniería Geomática y Topografía

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS DE PARÁMETROS SÍSMICOS DE DOS SERIES OCURRIDAS EN EL SUR Y ESTE DE ESPAÑA

Yaiza Gómez Espada

Julio 2015

Tutores:

M^a Belén Benito Oterino
Jorge M. Gaspar Escribano

*A mi mamá y mi abuela,
por esos buenos consejos, que valen más que nada.
Gracias de corazón.*

“Tú puedes con todo”

RESUMEN

El presente proyecto se basa en el estudio de los parámetros sísmicos de dos series acaecidas en dos emplazamientos españoles. Uno de ellos en el Golfo de Valencia, donde se encuentra la plataforma Castor, causante de la sismicidad inducida durante los meses de Septiembre y Octubre de 2013, debido a la inyección de gas en el subsuelo. Y el otro, en los municipios de Torreperogil y Sabiote, donde se registró una serie sísmica tipo enjambre, desde Octubre de 2012 hasta Octubre de 2013, de origen tectónico. Los dos modelos usados para establecer la recurrencia y el patrón de evolución de la sismicidad de ambas series son: la Ley de Gutenberg-Richter, a partir de la cual se obtienen a y b ; y el modelo de Secuencia de Réplicas de Tipo Epidémico (Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) model), definido por μ, K, c, α y p . Para llevar a cabo el análisis, se han dividido ambas series sísmicas en subseries menores, con el fin de obtener mayor resolución en la evolución temporal de los parámetros sísmicos. Los resultados obtenidos parecen evidenciar que algunos de los parámetros analizados pueden resultar buenos indicadores para discriminar entre sismicidad inducida y sismicidad disparada de origen tectónico. Por otro lado, el análisis de los parámetros permite caracterizar los emplazamientos donde se han producido las series sísmicas y, a través de dicha caracterización, poder calcular una tasa hipotética de terremotos a modo de predicción. Además, se ha llevado a cabo el estudio de los parámetros b y M_c mediante ventanas temporales deslizantes con recubrimiento. Finalmente, se muestra gráficamente la idoneidad de ambos modelos para las series sísmicas escogidas en este proyecto.

ABSTRACT

This project is based on the study of different seismic parameters for two seismic sequences that recently have occurred in Spain. One of them is associated with the gas storage operations started in the Castor platform, an offshore reservoir located in the Valencia Gulf (East Spain). This sequence was induced by some natural gas injections between the months of September and October, 2013. The other analysed seismic sequence took place in the towns of Sabiote and Torreperogil (Southern Spain), from October 2012 to October 2013, where a seismic swarm type activity was recorded and was more likely associated with tectonic activities. Two models are used in this study in order to analyse these sequences: The Gutenberg-Richter Law, from which a , b y M_c are obtained; and the Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) model, defined by μ , K , c , α and p . To perform the analysis, both seismic series have been divided into smaller subseries, so that more details are obtained. The results show the existence of some parameters that can provide some clues to discriminate between induced and triggered seismicity (tectonic origin). Furthermore, the analysis of the parameters allows characterizing the areas where the seismic sequences occurred. Through this characterization, it is possible to calculate a hypothetical seismic rate over there. Moreover, the temporal study of b and M_c parameters has also been carried out. At the end, the suitability of both models for the study of these seismic sequences is shown graphically.

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas aquellas personas que han sido partícipes en esta etapa de mi vida:

A mis dos niñas, Sandrita y Pouye, por todo lo que me han enseñado y ayudado. Sin ellas no habría sido posible este proyecto.

A mis tutores, por haberme dirigido y ofrecido el tema del trabajo, tan interesante en la línea de la investigación.

Al grupo de investigación en Ingeniería Sísmica, por ayudarme y aconsejarme en los momentos en los que lo he necesitado.

Al Instituto Andaluz de Geofísica (Universidad de Granada), por proporcionarme datos para este estudio.

A todos mis profesores de la carrera, por enseñarme lo que sé y el apoyo que me han dado estos 5 años.

Y finalmente, a mi familia, por ser el pilar fundamental en mi vida.

ÍNDICE

<i>Acrónimos</i>	11
1 Introducción.....	13
2 Objetivos.....	15
3 Marco teórico.....	17
3.1 Depuración, homogeneización y completitud del catálogo sísmico	17
3.2 Sismicidad inducida y sismicidad disparada.....	18
3.3 Estimación de parámetros de recurrencia (Ley de Gutenberg-Richter).....	19
3.3.1 Estimación de la magnitud mínima de completitud <i>Mc</i>	20
3.4 Decaimiento de la tasa de réplicas con el tiempo (Ley modificada de Omori-Utsu).....	22
3.4.1 Modelo de Secuencia de Réplicas de Tipo Epidémico (ETAS)	23
4 Series sísmicas analizadas	25
4.1 Serie sísmica de Torreperogil-Sabiote	25
4.2 Serie sísmica de Castor	26
5 Propuesta metodológica para el análisis de las series sísmicas	31
5.1 Datos de la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote.....	31
5.2 Datos de la serie sísmica de Castor.....	37
5.3 Preparación de los catálogos sísmicos	43
5.4 Aplicación del modelo Gutenberg-Richter y análisis temporal de parámetros sísmicos	44
5.5 Aplicación del modelo ETAS	45
6 Resultados y discusiones	47
6.1 Análisis de la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote	47
6.1.1 Estimación de los parámetros de recurrencia (Ley de Gutenberg-Richter).....	47
6.1.2 Análisis de la variación temporal de <i>b</i> y <i>Mc</i>	50
6.1.3 Decaimiento de réplicas: ajustes al modelo ETAS.....	58

6.2	Análisis de la serie sísmica de Castor	61
6.2.1	Estimación de parámetros de recurrencia (Ley de Gutenberg-Richter)	61
6.2.2	Análisis de la variación temporal de <i>b</i> y <i>Mc</i>	64
6.2.3	Decaimiento de réplicas: ajustes al modelo ETAS.....	66
7	Sumario de resultados y conclusiones	69
8	Futuras líneas de investigación.....	73
	<i>Referencias</i>	75
	<i>Índice de figuras</i>	79
	<i>Índice de tablas</i>	82
	<i>Anexos</i>	83



ACRÓNIMOS

- BC: Mejor Combinación.
- EMR: Método de Rango Total de Magnitudes.
- EMS1998: Escala Macrosísmica Europea de 1998.
- ETAS: Secuencia de Réplicas de Tipo Epidémico.
- G-R: Gutenberg-Richter.
- IAG: Instituto Andaluz de Geofísica.
- IGME: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGN: Instituto Geográfico Nacional.
- MAXC: Máxima Curvatura.
- MAXV: Máxima Verosimilitud.
- MMCC: Mínimos Cuadrados.
- NCSE: Norma de Construcción Sismorresistente Española.
- RMS: Error Medio Cuadrático.
- SISMIMUR: Plan de Emergencias ante el Riesgo Sísmico de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- UPM: Universidad Politécnica de Madrid.

1 INTRODUCCIÓN

La predicción de terremotos ha sido, desde siempre, uno de los objetivos de la comunidad científica. Se trata de estimar con la mayor precisión y fiabilidad posible cuándo y dónde ocurrirá un terremoto y qué tamaño tendrá. Pero la pregunta es: ¿Se pueden predecir los terremotos?. Aunque el modelo real es impredecible, existen tres escalas temporales de predicción: las de corto, medio y largo plazo. El tiempo que transcurre en las predicciones a corto plazo es de días e incluso horas y van dirigidas a la evacuación de la población; las predicciones a medio plazo duran semanas y están destinadas a la implantación de planes de emergencia; y finalmente, las predicciones a largo plazo, que se centran en la estimación del movimiento esperado en un tiempo de t años y tienen como objetivo llevar a cabo medidas de prevención, así como planificaciones urbanísticas, que aumenten la seguridad de la población ante un posible terremoto esperado.

Actualmente, se cuenta con mapas de sismicidad que muestran las zonas más propensas al suceso de terremotos y, además, mapas de peligrosidad sísmica que advierten de qué zonas poseen un alto o bajo grado de amenaza sísmica. Estos mapas son útiles para predicciones a medio y largo plazo, puesto que gracias a ellos se pueden establecer planes de emergencia en aquellas zonas con alto grado de peligro y, además, adoptar medidas preventivas, como el diseño sismorresistente, que permitan reducir la vulnerabilidad de las edificaciones.

Aunque en los últimos años se ha avanzado mucho en la predicción a largo plazo, la predicción a corto plazo aún sigue siendo un reto a conseguir. Se basa en la identificación de fenómenos precursoros que permitan establecer un nivel de alerta ante la ocurrencia de un evento en un espacio corto de tiempo. Algunos de los fenómenos precursoros considerados y estudiados son la disminución de agua en los pozos, el comportamiento anómalo de animales, deformaciones del suelo en las proximidades de fallas a través de medidas GPS, etc. Este tipo de predicción es de gran importancia, pero a su vez, de gran complejidad. De hecho, en la actualidad, no existe método fiable alguno para realizar predicciones sísmicas a corto plazo. Los estudios llevados a cabo recientemente van dirigidos al análisis de parámetros sísmicos para hacer posible dicha predicción.

En los últimos años, se ha producido un aumento de nuevas técnicas que actúan sobre el medio natural introduciendo o extrayendo fluidos en el interior de la Tierra y alterando su estado de esfuerzos. Como ejemplos se pueden mencionar casos de extracción de hidrocarburos, explotación de minas, almacenamiento subterráneo de CO₂, inyecciones de gas en el subsuelo, o la fracturación hidráulica (más conocida como *fracking*). Mundialmente estas técnicas se llevan implantando durante años en multitud de regiones, y se han comprobado los beneficios económicos que están causando. Sin embargo, como todo cambio, estas nuevas técnicas han provocado grandes polémicas, debido sobre todo, a los cambios medioambientales, sociales y



económicos que generan. Además, hay bastantes evidencias de generación de sismicidad inducida que, al no ser de origen natural, se considera asociada a causas antrópicas, lo que puede aumentar la peligrosidad de la zona donde se practican las técnicas mencionadas. Dichas técnicas, por tanto, deben ser desarrolladas y aplicadas con las máximas medidas de seguridad.

En España, un ejemplo podría ser el Proyecto Castor. Dicho proyecto tuvo muchas críticas desde antes de ser construido, pero más aún cuando se produjo la serie sísmica que tuvo lugar en las proximidades de la plataforma, situada en el Mar Mediterráneo, cerca de las costas de Castellón y Tarragona. Según el IGME (2013), las operaciones de inyección de gas en la plataforma Castor fueron la causa directa de la sismicidad inducida y posterior sismicidad disparada que se produjeron durante los meses de Septiembre y Octubre de 2013.

Otro caso polémico en España, supuestamente no vinculado a causas antrópicas como ocurría con Castor, fue la serie sísmica que tuvo lugar durante los años 2012 y 2013 en los municipios de Torreperogil y Sabiote (Jaén). La polémica se originó debido a que la población, acostumbrada a no sufrir algún tipo de actividad sísmica, no sabía por qué se estaban produciendo esa serie de eventos frecuentes en aquella zona. Existen diversas hipótesis, por ejemplo, Peláez *et al.* (2013) publicaron que el origen fue meramente tectónico. Sin embargo, Miguel de las Doblas y Antonio Aretxabala relacionaron los sismos con las altas presiones de un embalse cercano, supuestos causantes de los cambios en el subsuelo.

El presente proyecto se estructura de la siguiente manera:

Comienza con un breve resumen y apartado de acrónimos, tras los cuales, se introduce el tema del trabajo (sección 1) y se describen los objetivos que se persiguen (sección 2).

A continuación, en el apartado 3 se recogen los conceptos teóricos necesarios para abordar el estudio, y en el apartado 4, las descripciones de las dos series sísmicas analizadas en este PFG.

Más adelante, en el capítulo 5 se describen la metodología y criterios seguidos para el cálculo, y en el capítulo 6 los resultados y discusiones pertinentes.

Tras ello, en las secciones 7 y 8 se resumen las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación, respectivamente.

Finalmente, se incluyen la bibliografía utilizada y los anexos.

2 OBJETIVOS

El objetivo de este PFG comienza por analizar los parámetros de sismicidad de dos series acaecidas en España:

- La serie sísmica que se produjo en las proximidades de la plataforma Castor, durante los meses de Septiembre y Octubre de 2013, asociada a la inyección de gas en el subsuelo.
- El enjambre sísmico registrado en los municipios de Torreperogil y Sabiote durante los años 2012 y 2013.

Dichas series son interesantes por diversos motivos, entre los cuales se pueden destacar: la gran alarma social que provocaron, los emplazamientos donde se produjeron, y la frecuencia y magnitud de sismos registrada.

Para llevar a cabo el análisis se pretende dividir ambas series sísmicas en subseries menores (en función de la frecuencia diaria de sismos registrada), con el objetivo de estudiar más en detalle los valores que adquieren los parámetros en el transcurso de las respectivas series sísmicas.

Los parámetros a analizar pertenecen a dos modelos muy usados y ampliamente conocidos en ingeniería sísmica. Dichos modelos son:

- Relación Gutenberg-Richter: mediante la cual se establece la ley de recurrencia de una determinada zona.
- Modelo de Secuencia de Réplicas de Tipo Epidémico (ETAS): a través del cual se calcula la tasa de ocurrencia de terremotos.

Una vez realizados los ajustes, se trata de comprobar si ambos modelos representan adecuadamente la recurrencia y el patrón de sismicidad de las dos series mencionadas, es decir, si son idóneos para explicar la distribución de ambas series sísmicas.

Por otro lado, se pretende analizar la evolución temporal del parámetro b y de M_c , mediante ventanas temporales deslizantes en el tiempo con recubrimiento, de manera que se pueda ver si los parámetros siguen una tendencia constante o variable en el tiempo.

Finalmente, se comprueba si existe algún criterio que permita clasificar las series sísmicas analizadas en este PFG y compararlas con otras similares, tratando de identificar la existencia de algún tipo de patrón.

Como objetivo global del estudio, se trata de alcanzar una cierta sensibilidad sobre el comportamiento de los parámetros característicos de series sísmicas, y sobre su variación temporal. Se pretende ver qué información puede extraerse de la evolución temporal de los parámetros característicos de los dos modelos empleados: a , b , K , c , α , μ y p .

3 MARCO TEÓRICO

A continuación se definen algunos conceptos, ideas y fundamentos que resumen el marco teórico en el que se ha basado este trabajo. En primer lugar se describen los procedimientos generales necesarios en el tratamiento de cualquier catálogo. Por otro lado, al contar con una serie sísmica caracterizada por una supuesta sismicidad inducida y posterior sismicidad disparada, se explican y detallan, en el segundo apartado, los conceptos de ambos tipos de sismicidad y sus diferencias. A continuación, se definen los dos modelos (G-R y ETAS) usados para modelizar el comportamiento y evolución de las series, los parámetros que los caracterizan y las metodologías de cálculo existentes para realizar los ajustes de sismicidad y deducir esos parámetros característicos.

3.1 DEPURACIÓN, HOMOGENEIZACIÓN Y COMPLETITUD DEL CATÁLOGO SÍSMICO

El tratamiento de un catálogo sísmico requiere, en muchas aplicaciones, tres procesos necesarios: depuración, homogeneización del parámetro de tamaño, e identificación de la magnitud mínima de completitud M_c .

El proceso de depuración consiste, fundamentalmente, en eliminar aquellos eventos que sean réplicas o premonitores de un evento principal, así como otro tipo de agrupamientos (enjambres). Normalmente, se basa en la hipótesis del ajuste a un modelo de Poisson de la sismicidad de cada zona, en otras palabras, se consideran los sismos aleatoriamente distribuidos, sin ningún tipo de dependencia espacial o temporal. Esta hipótesis, por tanto, es asumible si se tienen en cuenta sólo los terremotos principales, eliminando las réplicas y premonitores que estén asociados al mismo proceso de ruptura. Sin embargo, no existe un criterio estadístico único y definitivo para delimitar la extensión de los terremotos no principales de una serie, conjuntamente en el espacio y en el tiempo. Los algoritmos más utilizados para llevar a cabo este proceso de identificación y eliminación de agrupamientos son los propuestos por Gardner y Knopoff (1974) y por Reasenberg (1985), los cuales fijan unas ventanas de extensión temporal y espacial en función de la magnitud del terremoto principal (IGN-UPM, 2013). Por otro lado, la depuración también consiste en eliminar aquellos eventos de los cuales no se sepa su magnitud o intensidad, que estén duplicados por diversas causas, y/o que se localicen a ciertas profundidades a partir de las cuales se pueda considerar que su influencia en la peligrosidad no es significativa (web SISMIMUR: http://www.112rm.com/dgsce/planes/sismimur/sis_anexo_4b.html).

El proceso de homogeneización consiste en elaborar un catálogo sísmico con una escala única para expresar el parámetro de tamaño. En otras palabras, se trata de convertir los datos de intensidad o magnitud de cada uno de los terremotos registrados por las estaciones, a un parámetro y escala común, para tener una medida homogénea del tamaño de los eventos. Actualmente se ha generalizado para este fin la adopción de la magnitud momento M_w .

Por otro lado, el catálogo original no se considera completo, ya que los eventos de magnitudes pequeñas se registran con más dificultad que los de magnitudes grandes, o son tan pequeños que no se llegan a registrar. Por ello, previamente al cálculo, se debe establecer una magnitud mínima a partir de la cual se considere que los terremotos están registrados en su totalidad. Esta es la denominada M_c .

3.2 SISMICIDAD INDUCIDA Y SISMICIDAD DISPARADA

Diferenciar entre la sismicidad inducida y la disparada es una tarea difícil ya que, en general, ambas están relacionadas con actividades no naturales.

La sismicidad inducida es debida, generalmente, a actividades antrópicas que ocasionan eventos de magnitudes pequeñas (menores a 3.0) localizados en las proximidades de los sitios donde se practican dichas actividades (Simpson *et al.*, 1988 y Redmayne, 1988). Normalmente, estos sismos no generan peligro, ya que las actividades suelen estar controladas y previamente estudiadas para no ocasionar riesgo alguno.

Se podría decir que existe otro tipo de sismicidad inducida, que abarca terremotos de magnitudes más grandes producidos en fallas tectónicas cercanas (Gupta, 2002 y Mekkawi *et al.*, 2004). Este tipo de actividad recibe el nombre de sismicidad disparada o activada (Eagar *et al.*, 2006), y se genera en el momento en el que las actividades humanas proporcionan una pequeña, pero fundamental, variable al sistema independientemente cercano a la inestabilidad, ocasionando la ruptura del mismo y generando así los terremotos mayores. En otras palabras, una pequeña acción produce una fuerte reacción, como es el simple gesto de apretar el gatillo de una pistola con el dedo, lo que hace que se libere la gran cantidad de energía explosiva almacenada en el propulsor.

La sismicidad disparada es el tipo de sismicidad inducida más importante y peligroso, y no debe confundirse con la sismicidad inducida explicada al comienzo del apartado. Por tanto, en el presente proyecto se ha hecho la distinción entre sismicidad inducida y disparada asumiendo que la primera se asocia comúnmente a actividades antrópicas y generalmente implica grandes esfuerzos locales que generan pequeños terremotos (< 3.0), que caen en el rango de microsismos (temblores detectables sólo por sismógrafos), debido al aumento de la presión de los poros en el subsuelo tras una alteración antrópica del medio. Generalmente, la sismicidad inducida se ha asociado sobre todo con la minería, la construcción de diques, el llenado de embalses, la inyección en yacimientos de petróleo o de gas, etc.

La segunda, en cambio, implica actividad en estructuras tectónicas, donde el estado de esfuerzos sobrepasa el límite elástico provocando que las fallas existentes se activen, debido a un factor

externo (natural o antrópico) que adelanta el estado natural de tensiones del subsuelo, originando terremotos de mayor magnitud.

3.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE RECURRENCIA (LEY DE GUTENBERG-RICHTER)

Este modelo, que relaciona la frecuencia de ocurrencia de terremotos y su magnitud, fue inicialmente propuesta por Ishimoto e Ida (1939) en Japón y Gutenberg y Richter (1944, 1954) en Estados Unidos. Es uno de los modelos más usados en sismología para establecer el patrón de sismicidad o ley de recurrencia de una zona. Muestra la distribución relativa del tamaño de los terremotos, afirmando que el logaritmo del número acumulado de sismos ($N (\geq m)$) en una región y ventana de tiempo específicos, que superan cada grado de magnitud (m), varía linealmente con este parámetro, mediante dos constantes positivas, a y b . La relación queda definida por la siguiente expresión:

$$\log N (\geq m) = a - bm \quad (1)$$

donde b (pendiente de la recta) indica la proporción de sismos grandes frente a pequeños: si b aumenta, disminuye la proporción, implicando una concentración de esfuerzo menor en la zona; sin embargo, cuando b disminuye, aumenta la proporción, lo que significa una concentración de esfuerzos mayor. Por tanto, existe una relación inversa entre b y el nivel de esfuerzo. El valor de b varía de región en región (Kossobokov y Keilis-Borok, 2000) pero se encuentra generalmente en el rango $0.8 < b < 1.2$ (Frohlich y Davis, 1993). El valor a , por otro lado, es una medida del nivel de sismicidad regional (Kossobokov y Keilis-Borok, 2000), es decir, el total de eventos esperados en la región. Matemáticamente representa la extrapolación de la relación lineal hasta magnitud cero.

Gutenberg y Richter usaron el método de los MMCC para estimar los parámetros a y b . Este método trata de minimizar la suma cuadrática de los residuos que se obtienen al ajustar a una recta el número acumulativo de sismos que superan diferentes grados de magnitud. Una de las ventajas más destacables de este método es su sencillez e inmediata aplicabilidad. Sin embargo, también presenta algún inconveniente al aplicarlo en el caso específico de la ley G-R, como es la dependencia entre sí de los puntos que se ajustan, dado que las tasas de las magnitudes bajas incluyen eventos observados de magnitudes mayores (IGN-UPM, 2013).

Como alternativa, se ha comprobado que el método de MAXV (Aki 1965, Bender 1983) es una técnica de mayor solidez que la de MMCC (Molina y Ruiz, 2002). Este método trata de encontrar el valor de uno o más parámetros que permita que la distribución de probabilidad conocida sea máxima (Aki, 1965).

3.3.1 Estimación de la magnitud mínima de completitud M_c

Un parámetro crucial en el cálculo del valor del parámetro b es M_c . Dicho parámetro establece la magnitud mínima a partir de la cual se considera completo el catálogo sísmico, y por consiguiente, es la magnitud umbral desde la que se tienen en cuenta los eventos para el ajuste y cálculo de parámetros. A partir de dicha magnitud, los datos suelen ajustarse adecuadamente a la recta G-R.

Como se muestra en la gráfica izquierda de la Figura 1, aunque la mayoría de los datos registrados se ajustan adecuadamente a la ecuación de una recta (línea roja), la relación lineal no se mantiene en el caso de magnitudes muy pequeñas o muy grandes. Se puede observar cómo a partir de la magnitud 1.7, los datos se ajustan perfectamente a una recta; sin embargo, si se continuase dicha línea hacia magnitudes inferiores se observaría una sobrestimación del número de eventos (sin olvidar que la escala utilizada en el eje de ordenadas es logarítmica). Esto indica que existe una falta de registro de terremotos pequeños, bien porque alrededor del emplazamiento no hay suficientes estaciones como para registrar los sismos (red escasa), están muy lejos, o porque las estaciones existentes no poseen la suficiente sensibilidad para detectarlos.

Por el contrario, se puede observar cómo en la gráfica derecha de la Figura 1, el modelo no ajusta adecuadamente a los datos, ya que la extrapolación de la recta al eje de abscisas sobrestima el número de eventos de magnitudes grandes, lo que en última instancia podría conllevar, por ejemplo, a construir estructuras preparadas para sismos de magnitudes altas que no se producirían con la frecuencia real, lo que significaría un mayor coste. Existen dos posibles motivos por los que el modelo no ajusta bien a los datos de la serie: que falten por registrar terremotos de magnitudes grandes que no hayan sucedido todavía, o que la M_c establecida sea muy baja.

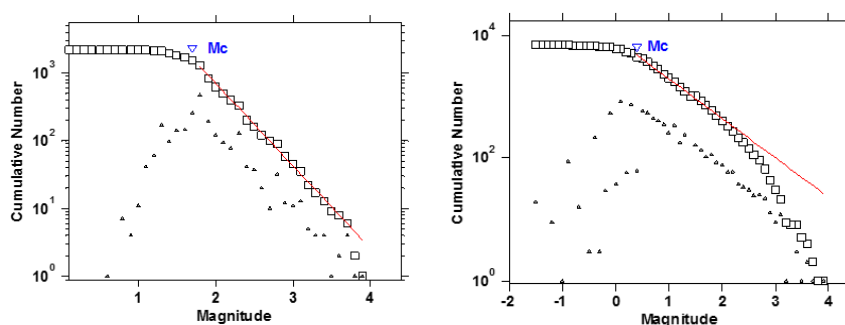


Figura 1. **Relación G-R.** Los datos de la gráfica izquierda (con una M_c de 1.7), se ajustan adecuadamente a la recta. Sin embargo, los de la derecha (con una M_c de 0.4), no reproducen un buen modelo de G-R. Gráficas con distinta escala.

Por tanto, el criterio para escoger un valor de M_c adecuado depende del rango de magnitudes que se estén sobrestimando en el ajuste. En otras palabras, es más lógico establecer una M_c que haga que se sobrestime el número de terremotos de magnitudes pequeñas (debido a la falta de

registro de los mismos y la mayor incertidumbre en su descripción de localización, tamaño, etc., frente a los terremotos de magnitudes grandes), que el de magnitudes altas (más fiables en su definición).

En cualquier caso, se pone de manifiesto la importancia de elegir o estimar correctamente M_c , por las implicaciones que puede tener en la estimación de la magnitud máxima $M_{m\acute{a}x}$, además de en la proporción entre magnitudes.

Entre los métodos más usados para estimar el valor de M_c se encuentran: MAXC (Wiemer y Wyss, 2000), BC (Wiemer y Wyss, 2000), y EMR (Woessner y Wiemer, 2005), entre otros.

Máxima Curvatura

El método de MAXC consiste en definir M_c como el punto resultante de la primera derivada de la curva frecuencia-magnitud. En otras palabras, M_c corresponde con la magnitud en la que se hayan registrado mayor número de terremotos (Figura 2). A pesar de la fácil aplicación, fiabilidad y rapidez de este método, predenta el problema de subestimar a menudo el valor de M_c , especialmente para distribuciones de frecuencia-magnitud gradualmente curvadas (Avith, 2012).

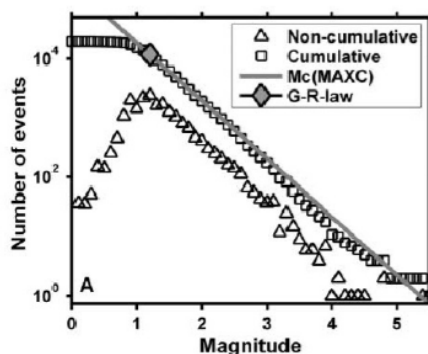


Figura 2. Resultado de M_c por el método MAXC. Se indica con un diamante en la distribución acumulada (cuadrados), que corresponde con el pico de la distribución no acumulativa (triángulos). La línea gris representa la relación G-R correspondiente a esta distribución. Fuente: Woessner y Wiemer (2005).

Mejor Combinación

El método de BC está basado en el método de MAXC. La diferencia es que en este método se establece un intervalo de confianza del 95% para el cálculo. Es decir, que la probabilidad de que el valor verdadero del parámetro a estimar se encuentre dentro del intervalo de confianza (o rango), es del 95 %. En conclusión, este método permite saber que los resultados de M_c son fiables y garantizan un sesgo menor en cálculos próximos que dependan directamente de la M_c (Avith, 2012).

Rango Total de Magnitudes

El método de EMR utiliza la totalidad de datos (todo el rango de magnitudes) para hallar M_c de manera más robusta. El modelo consta de dos partes: un modelo para la parte completa de la distribución frecuencia-magnitud ($M > M_c$), donde se asume un comportamiento de ley de potencia y se procede a calcular los valores a y b mediante MAXV (Aki, 1965); y uno para la parte incompleta ($M < M_c$), en la cual se usa la probabilidad de que una red sísmica detecte un evento de cierta magnitud. La mejor estimación de M_c es aquella en la que se maximiza la distribución de probabilidad para ambos modelos (Avith, 2012).

3.4 DECAIMIENTO DE LA TASA DE RÉPLICAS CON EL TIEMPO (LEY MODIFICADA DE OMORI-UTSU)

En 1894, Omori, tras observar que el número de réplicas de los sismos de Nobi (Japón, 1981) y de otros dos terremotos en Japón, decreció con el tiempo, propuso una fórmula que representa la decadencia de la tasa de réplicas con el tiempo. Posteriores investigaciones (Utsu (1957), Utsu, 1961 y Utsu *et al.*, (1995)) dieron lugar a una expresión modificada, siendo ambas ampliamente usadas. Cualquier teoría sobre el origen de réplicas debe explicar esta ley, única por su poder de dependencia en el tiempo. Su expresión es la siguiente:

$$n(t) = \frac{K}{(t+c)^p} \quad (II)$$

Como se puede observar, la tasa de réplicas en un tiempo t después del terremoto principal, $n(t)$, es inversamente proporcional al tiempo (elevado a una cierta potencia). La fórmula original de Omori asume que p es constante y su valor es uno. Sin embargo, la expresión modificada no da por hecho este valor, pudiendo variar entre 0.7 y 1.5, lo que afecta enormemente a la tasa de decaimiento, puesto que un pequeño aumento del valor de p , reducirá enormemente dicha tasa. K depende del límite inferior de magnitudes de las réplicas consideradas en $n(t)$, o dicho de otro modo, depende de la M_c ; p y c son constantes independientes de esta elección del límite inferior en la magnitud M_c , siendo p la tasa de decaimiento de las réplicas.

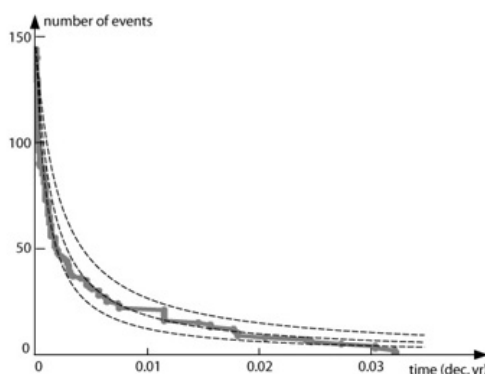


Figura 3. Representación gráfica del número de eventos registrados desde la ocurrencia del sismo principal, durante el tiempo t (Ley modificada de Omori-Utsu).

3.4.1 Modelo de Secuencia de Réplicas de Tipo Epidémico (ETAS)

El modelo ETAS, propuesto por Ogata (1988), representa la actividad de terremotos de magnitud mayor o igual a M_r en una región durante un periodo de tiempo. Este modelo ha sido bien estudiado y actualmente es un modelo estándar para testear hipótesis relacionadas con actividad sísmica (Ogata, 1998). Este modelo es una combinación de la ley de recurrencia de magnitudes de G-R y de la ley de caída temporal de réplicas de Omori.

Cada terremoto, entendiendo como terremoto cualquier evento (pudiendo ser réplica), es seguido de su actividad de réplicas, aunque sólo las réplicas de magnitud mayor o igual a M_r son incluidas en la muestra de datos. La actividad de réplicas está representada por un proceso no-estacionario de Poisson de acuerdo con la fórmula modificada de Omori (Utsu, 1961) de tal forma que la tasa de ocurrencia de terremotos que suceden a un evento principal en un tiempo t sigue la expresión:

$$\lambda(t) = \mu + K \sum_{t_i < t} \frac{e^{\alpha(m-M_r)}}{(t-t_i+c)^p} \quad (III)$$

Los cinco parámetros μ , α , p , c y K , representan algunas características de la actividad sísmica de la región. Además, pueden estar correlacionados con condiciones tectónicas y variar espacial y temporalmente en algunos casos. μ (eventos por unidad de tiempo) representa la tasa de sismicidad de fondo, K representa la productividad de un evento de magnitud umbral M_r , el sumatorio se toma sobre las réplicas que se producen antes del tiempo t , c (unidad de tiempo escogida para el estudio) y p son los parámetros de la Ley de Omori-Utsu que describen el decaimiento de la secuencia de réplicas, y α mide la eficiencia de magnitud de un terremoto de generar sus hijos, o dicho en un sentido amplio, sus réplicas (Ogata (1987,1992)). Por ejemplo, una actividad tipo enjambre tiene un α más pequeña que aquella que posea un terremoto principal y sus réplicas.

De la estimación del modelo ETAS, se puede predecir la tasa de ocurrencia esperada de terremotos en secuencias normales. Comparando la tasa predicha con la observada, pueden reconocerse diferencias relativas de disminución o aumento de actividad sísmica (Ogata (1988, 1989, 1992)).

4 SERIES SÍSMICAS ANALIZADAS

4.1 SERIE SÍSMICA DE TORREPEROGIL-SABIOTE

Las poblaciones de Torreperogil y Sabiote están situadas en el extremo oriental de la Cuenca del Guadalquivir, en la provincia de Jaén, España (Figura 4). El emplazamiento donde ocurrieron los terremotos se caracteriza por ser una zona de baja peligrosidad sísmica (Peláez y López, 2002; NCSE, 2002), es decir, con valores de aceleración horizontal del suelo, esperados para un periodo de retorno de 475 años, de 0.07-0.11 g (Figura 5). Por otra parte, este sector de la Cuenca del Guadalquivir ha sido considerado como de baja actividad sísmica (Sanz de Galdeano y Peláez, 2011).

Se puede comprobar en la Figura 6 que la serie sísmica registrada en los años 2012 y 2013 constituye una anomalía estadística relevante al compararla con la sismicidad registrada en el mismo entorno en los últimos 15 años. Se observa, además, que la sismicidad observada en Diciembre, Enero y Febrero se diferencia claramente de la del resto de meses.

Para comprobar que el aumento de la sismicidad durante los meses del 2012 y 2013 no fue debido únicamente al incremento de estaciones sísmicas en torno a la zona donde se registraba actividad, se ha establecido como magnitud de partida en la representación $M_w = 2$. Esta magnitud asume que el registro de los terremotos representados en los histogramas habría sido el mismo habiendo incrementado o no la red de estaciones, ya que terremotos de magnitudes a partir de 2.0 ya son detectables por la red fija.

La serie sísmica comenzó a registrarse a partir del 20 de Octubre 2012. La magnitud máxima alcanzada fue de 3.9 M_w , correspondiente a un sismo ocurrido el 05 de Febrero 2013. Esta serie de sismos despertó el interés de científicos expertos en el área debido, por una parte, a la ausencia de fallas en el lugar a las que atribuir el origen de los mismos, generando así diversos estudios de la zona y margen tectónico de la misma, y por otro lado, como resultado de la alarma que se produjo en la población, al sentirse un gran número de los terremotos ocurridos, lo que desencadenó un impacto mediático que determinó la ordenación de investigaciones científicas por parte de las autoridades gubernamentales (Yazdi y Quirós, en prensa).



Figura 4. Localización geográfica de las poblaciones de Torreperogil y Sabiote.

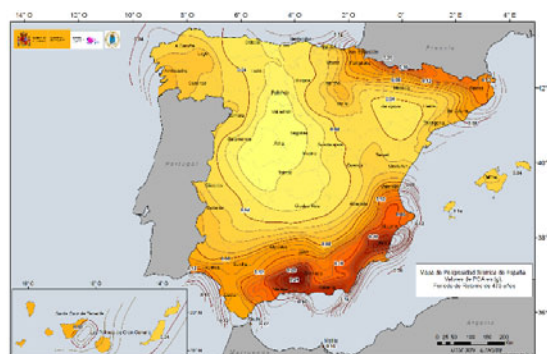


Figura 5. Valores de aceleración para toda España. Fuente: IGN-UPM

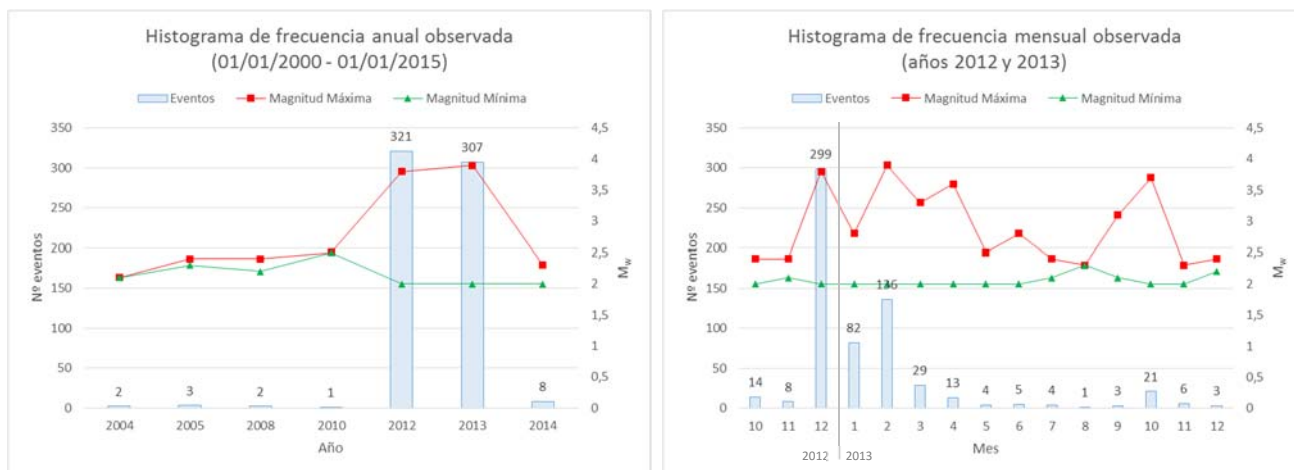


Figura 6. Nivel de actividad sísmica registrada en Torreperogil-Sabiote en los últimos 15 años, y durante los meses del 2012 y 2013. Datos sísmicos procedentes del catálogo del IGN para un recuadro de latitudes 37.9551°N/38.0982°N y longitudes 3.3875°W/3.1562°W.

4.2 SERIE SÍSMICA DE CASTOR

El Proyecto Castor trata de aprovechar un antiguo yacimiento petrolífero ya explotado (Amposta), situado en el Mar Mediterráneo, frente a las costas de Castellón y Tarragona (Figura 7), para ser utilizado como un almacén subterráneo de Gas Natural. Se compone de una plataforma marina fija, situada a 1.750 metros de profundidad y 22 kilómetros de la costa, desde la que se han perforado 13 pozos para inyectar primero el gas natural y después extraerlo, una planta terrestre y un gasoducto para conectar ambas instalaciones (Figura 8). El depósito tiene capacidad para almacenar una cantidad de gas natural equivalente a lo que consume toda España en 50 días (Escal UGS, 2012), siendo creado para suplir la demanda energética española de gas natural en caso de escasez o cese de las importaciones.

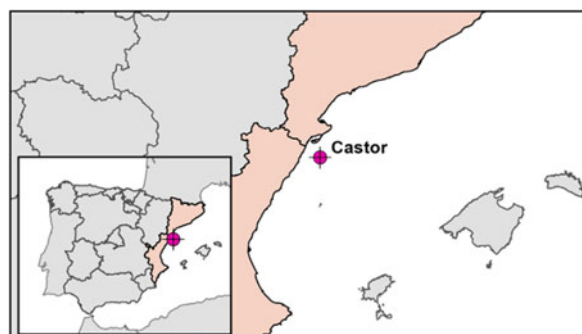


Figura 7. Localización geográfica de la plataforma marina Castor.

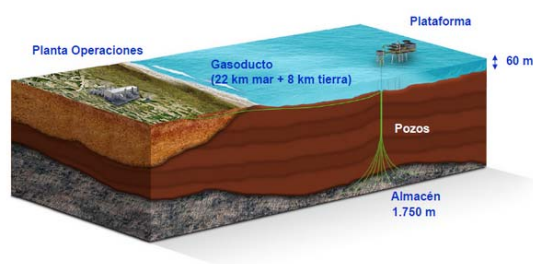


Figura 8. Esquema general de las instalaciones del Proyecto Castor. Fuente: Escal UGS.

Dicha región, como ocurre en el caso de Torreperogil y Sabiote, se caracteriza por tener una baja sismicidad histórica de origen natural (Figura 5). Se puede comprobar en la Figura 9 que la serie sísmica registrada en el año 2013 en el entorno del almacén Castor constituye una anomalía estadística relevante al compararla con la sismicidad registrada en el mismo entorno en los últimos 15 años. Se observa, además, que

la sismicidad registrada en Septiembre y Octubre se diferencia claramente de la del resto de los meses del año, donde es casi nula. Si a eso se suma que la inyección de gas comenzó el 2 de Septiembre, empezando a registrarse sismicidad el 5 de Septiembre, se observa que existe una correlación entre la inyección y la serie sísmica registrada.

Al igual que se ha hecho con la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote, se establece una $M_w = 2$ de corte para hacer la representación gráfica de los histogramas (Figura 9). De esta forma, si se compara la sismicidad de los meses de Septiembre y Octubre de 2013 con los registros observados en el resto de meses y años, se confirma que el aumento de sismicidad no se debió al incremento de estaciones sísmicas en la zona, sino únicamente a la inyección del gas en el subsuelo, ya que los eventos de magnitudes mayores a 2.0 son detectables por la red fija del IGN.

El hecho de que se empezasen a producir una serie de microsismos debido a la inyección era previsible. Lo que no se esperaba, era el rápido aumento del número de eventos por día que se registraban y las magnitudes que alcanzaban (el día 13 de Octubre se llegaron a registrar más de 20 terremotos, alcanzando una magnitud de 3.2 M_w). Esto provocó que el 16 de Septiembre, debido a la alarma social (al sentirse un gran número de los terremotos ocurridos), se paralizase la inyección. Se observó un descenso paulatino de la sismicidad tras el cese, sin embargo, el 24 de Septiembre volvieron a registrarse más de 20 eventos, alcanzando una magnitud de 3.7 M_w . A partir de dicho día, comenzaron a registrarse varias subseries sísmicas (importantes en altas frecuencias de eventos y magnitudes alcanzadas) en cortos periodos de tiempo, que podrían explicar la sismicidad disparada debida a la inyección. Muchos de los sismos fueron sentidos por la población, llegando a intensidades de II (EMS1998). Se puede destacar la sismicidad ocurrida desde el 29 de Septiembre hasta el 4 de Octubre, periodo en el que se llegaron a registrar más de 50 eventos diarios y a alcanzar magnitudes máximas superiores a 4.0 M_w . Las magnitudes más altas de la serie se produjeron, por tanto, una vez paralizadas las actividades de inyección.

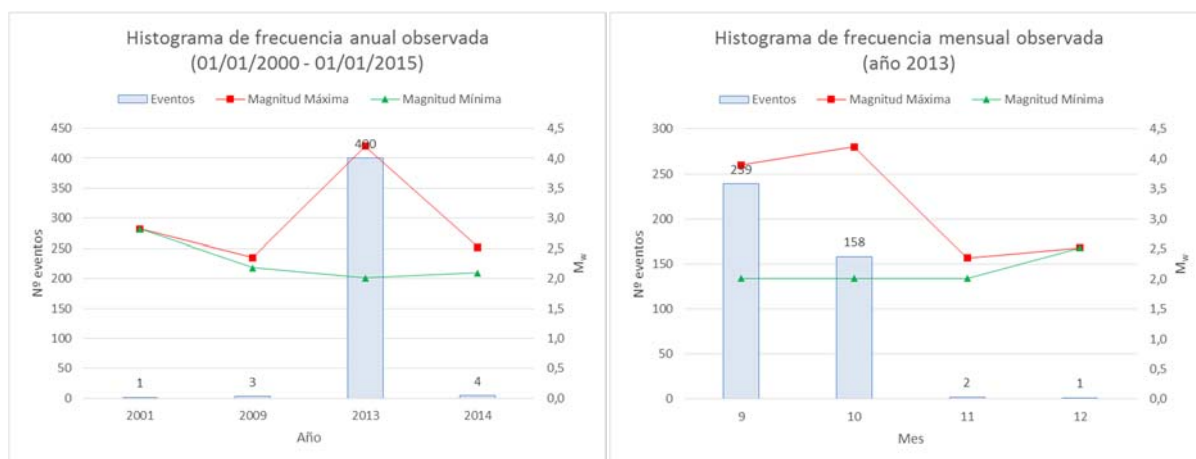
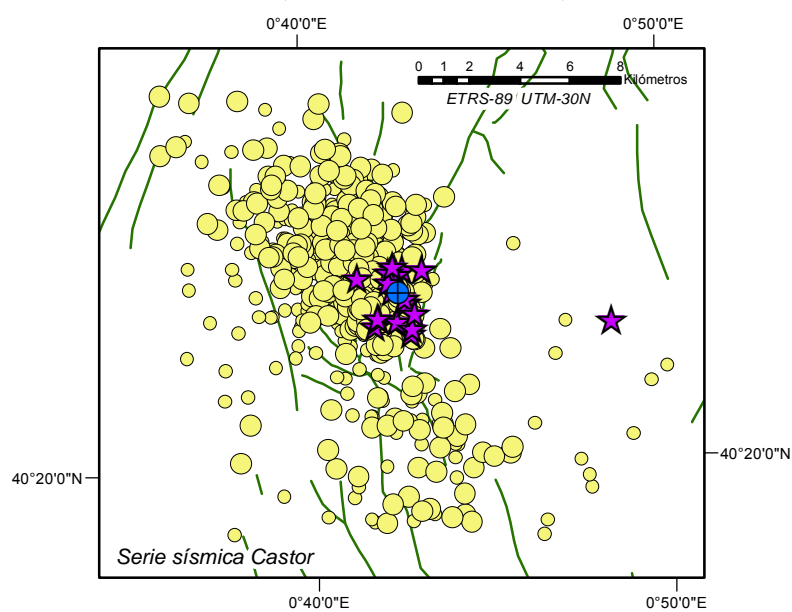
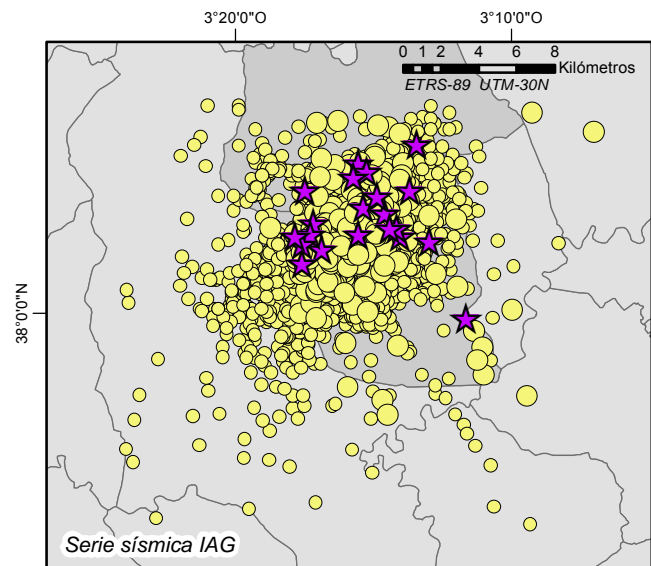
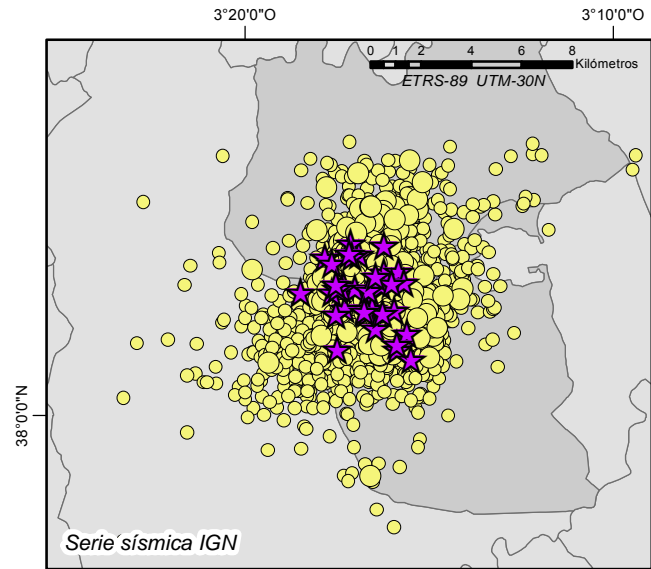


Figura 9. Nivel de actividad sísmica registrada en torno a la plataforma Castor durante los últimos 15 años, y durante los meses de 2013. Datos sísmicos procedentes del catálogo del IGN para un recuadro de latitudes 40.30°N/40.48°N y longitudes 0.60°E/0.84°E. Gráficas con distinta escala.

Distribución geográfica de las series sísmicas



Leyenda

- ★ Mw > 3.0
- 3.0 ≥ Mw > 2.0
- Mw ≤ 2.0
- ⊕ Plataforma Castor
- Sistema de fallas

5 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE LAS SERIES SÍSMICAS

En este apartado se detallan las características de los catálogos de ambas series sísmicas (Torreperogil-Sabiote y Castor) y el proceso metodológico llevado a cabo para el análisis de los parámetros de cada una de ellas. Se indican las distintas fuentes (instituciones, organismos, etc.) de donde se han obtenido los datos para llevar a cabo el estudio. Además, en base a las características analizadas, se explican los criterios establecidos para llevar a cabo las divisiones de ambas series en subseries sísmicas, con el fin de obtener un mayor grado de detalle en el estudio de los parámetros y analizar sus variaciones temporales. A continuación, se describe el proceso de preparación de los catálogos que se ha realizado en este estudio en función de las series sísmicas analizadas. Finalmente, se especifican las herramientas usadas para realizar los cálculos y ajustes de los modelos G-R y ETAS y el análisis temporal de b y M_c , describiéndose las bases de datos con las que operan, los inputs que se deben introducir y la metodología de cálculo que sigue cada una.

5.1 DATOS DE LA SERIE SÍSMICA DE TORREPEROGIL-SABIOTE

Para el presente estudio se dispone de dos catálogos de terremotos procedentes de distintas fuentes: uno de ellos de la página web oficial del IGN, que cuenta con un total de 2221 eventos; y el otro del IAG (Universidad de Granada), con 7020 eventos. Como se puede comprobar, el catálogo del IAG posee bastantes más registros que el del IGN, ya que dispone de una red de estaciones locales más densa y mejor distribuida que favorecen el registro de las ondas sísmicas. La fecha de inicio de la serie sísmica, en ambos catálogos, es el 21 de Octubre de 2012, y finaliza el 31 de Octubre de 2013. El objetivo de calcular los parámetros sísmicos en los dos catálogos citados anteriormente es comparar los resultados obtenidos entre sí y ver de qué manera se asemejan y/o difieren.

La descarga del catálogo del IGN se llevó a cabo a través de su página web oficial (www.ign.es) el día 9 de Febrero de 2015. La ventana espacial está comprendida entre las latitudes $37.9551^{\circ}N/38.0982^{\circ}N$, y las longitudes $3.3875^{\circ}W/3.1562^{\circ}W$. Dicho catálogo posee información acerca de: el identificador del evento (único para cada terremoto), la fecha y hora de registro, localización geográfica, profundidad (km), y el tamaño (Intensidad (EMS1998), m_{bLg} ó M_w).

El catálogo facilitado por el IAG está definido por una ventana espacial muy similar a la del IGN (latitudes $37.9^{\circ}N/38.099^{\circ}N$ y longitudes $3.398^{\circ}W/3.117^{\circ}W$) y posee la siguiente información: fecha y hora, indicador de distancia (local para toda la serie), latitud, longitud y profundidad (km), agencia de información hipocentral (IAG), número de estaciones usadas, RMS de tiempos residuales, magnitud1 (magnitud con la que se ha registrado el terremoto), tipo de magnitud1 (magnitud duración M_D), agencia de información de magnitud (IAG), magnitud2 (en caso de que el mismo evento se haya registrado, además, con otro tipo de magnitud distinta), y tipo de magnitud2 (M_w).

El análisis y posterior estudio de parámetros sísmicos se ha llevado a cabo no solo teniendo en cuenta la serie completa, sino que además se ha decidido subdividir la misma en cuatro etapas, en función de la frecuencia diaria de sismos, las cuales se describen a continuación:

Primera etapa

En el caso de la subserie del IGN, comienza con dos días (21 y 22 de Octubre de 2012) en los que se llegaron a registrar más de 30 terremotos por día. A partir del 23 de Octubre, prácticamente no se alcanzaron 10 terremotos diarios, hasta el 15 de Diciembre, cuando se produjo un cambio significativo en la frecuencia del número de eventos (pasando de registrarse prácticamente 10 terremotos diarios a casi 50 sismos/día (ver Figura 10). Por el contrario, en la subserie sísmica del IAG no se superaron 10 terremotos diarios en toda la etapa, pasando a casi 80 eventos el 15 de Diciembre. Dicho cambio es el criterio seguido para separar esta primera etapa de la segunda. El motivo de que se hayan registrado menos terremotos en la subserie del IAG, es que la red local se estableció ya empezada la serie sísmica. Sin embargo, las estaciones del IGN son permanentes.

Segunda etapa

La subserie comienza con un aumento considerable de la frecuencia diaria de terremotos, llegando a registrarse 100 sismos el día 17 de Diciembre de 2012, en el caso de la subserie del IGN. En la subserie del IAG, fue el día 22 de Diciembre cuando se registró el mayor número de eventos correspondiente a esta etapa, con un total de 316 sismos/día. Esta etapa acaba el 22 de Enero de 2013, cuando el número de terremotos diarios decae progresivamente llegando a ser prácticamente nulo. Se puede comprobar cómo, finalizada la primera etapa, el número de eventos registrados por el IAG es mucho mayor que los registrados por el IGN (Figura 10).

Tercera etapa

Comienza con un nuevo incremento de la frecuencia diaria de sismos, hasta alcanzar los valores máximos de toda la serie sísmica (150 terremotos diarios en la subserie del IGN, y 800 en la subserie del IAG, ambos registrados el 5 de Febrero de 2013). Tras ello se observa una disminución progresiva del número de eventos por día, hasta anularse prácticamente la sismicidad el 9 de Marzo de 2013.

Cuarta etapa

Esta subserie, similar a la primera, se considera en este estudio una etapa distinta debido a la baja sismicidad que presenta, comparado con la etapa anterior. La frecuencia de sismos rara vez supera los 10 terremotos diarios.

A través de esta división por etapas de la serie sísmica se pretende estudiar, con mayor grado de detalle, la posible variación temporal de los parámetros de sismicidad, pudiendo detectar ciertas anomalías, en cortos periodos de tiempo, que en un estudio general o completo de la serie se ocultarían y serían más difíciles de detectar.

Tabla 1. Esquema de las características generales de la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote (catálogos del IGN e IAG), y sus etapas.

				IGN				
Serie Sísmica	Fecha Inicio	Fecha Fin	Días	Nº Eventos	M _w Min	M _w Máx	ProfMin(Km)	ProfMax(Km)
COMPLETA	21/10/2012	31/10/2013	376	2221	0,6	3,9	0	16
1ª SUBDIVISION	21/10/2012	14/12/2012	55	174	1,1	3,4	0	16
2ª SUBDIVISION	15/12/2012	22/01/2013	39	1187	0,8	3,8	0	8
3ª SUBDIVISION	23/01/2013	09/03/2013	46	617	0,6	3,9	0	10
4ª SUBDIVISION	10/03/2013	31/10/2013	236	243	1	3,7	0	9

				IAG				
Serie Sísmica	Fecha Inicio	Fecha Fin	Días	Nº Eventos	M _w Min	M _w Máx	ProfMin(Km)	ProfMax(Km)
COMPLETA	21/10/2012	31/10/2013	376	7020	-1,5	3,9	0	20
1ª SUBDIVISION	21/10/2012	14/12/2012	55	49	0,3	3,4	0	13,2
2ª SUBDIVISION	15/12/2012	22/01/2013	39	4377	-1,5	3,6	0	10,6
3ª SUBDIVISION	23/01/2013	09/03/2013	46	2225	-0,9	3,9	0	13,1
4ª SUBDIVISION	10/03/2013	31/10/2013	236	369	-0,9	3,7	0	20

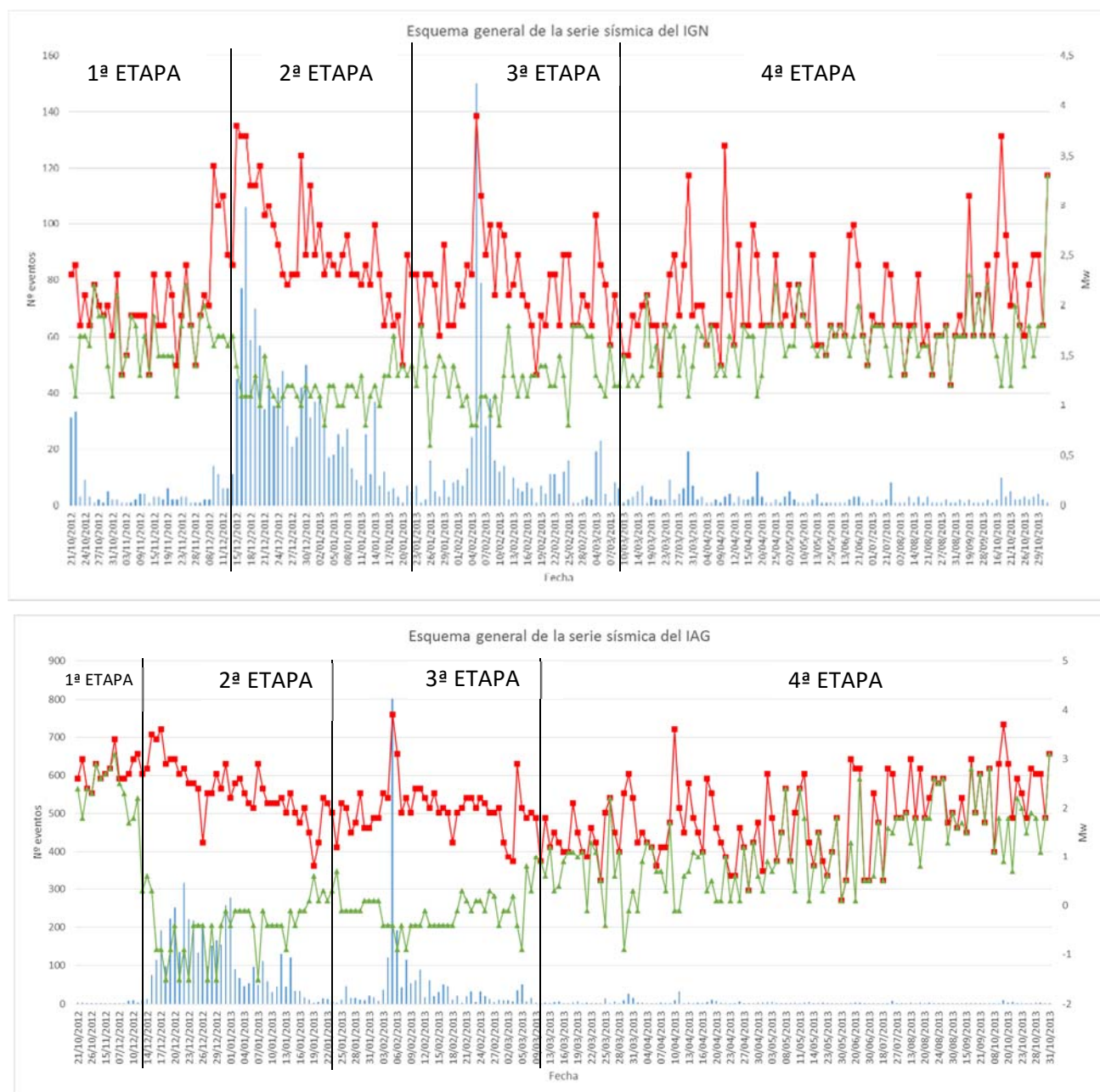
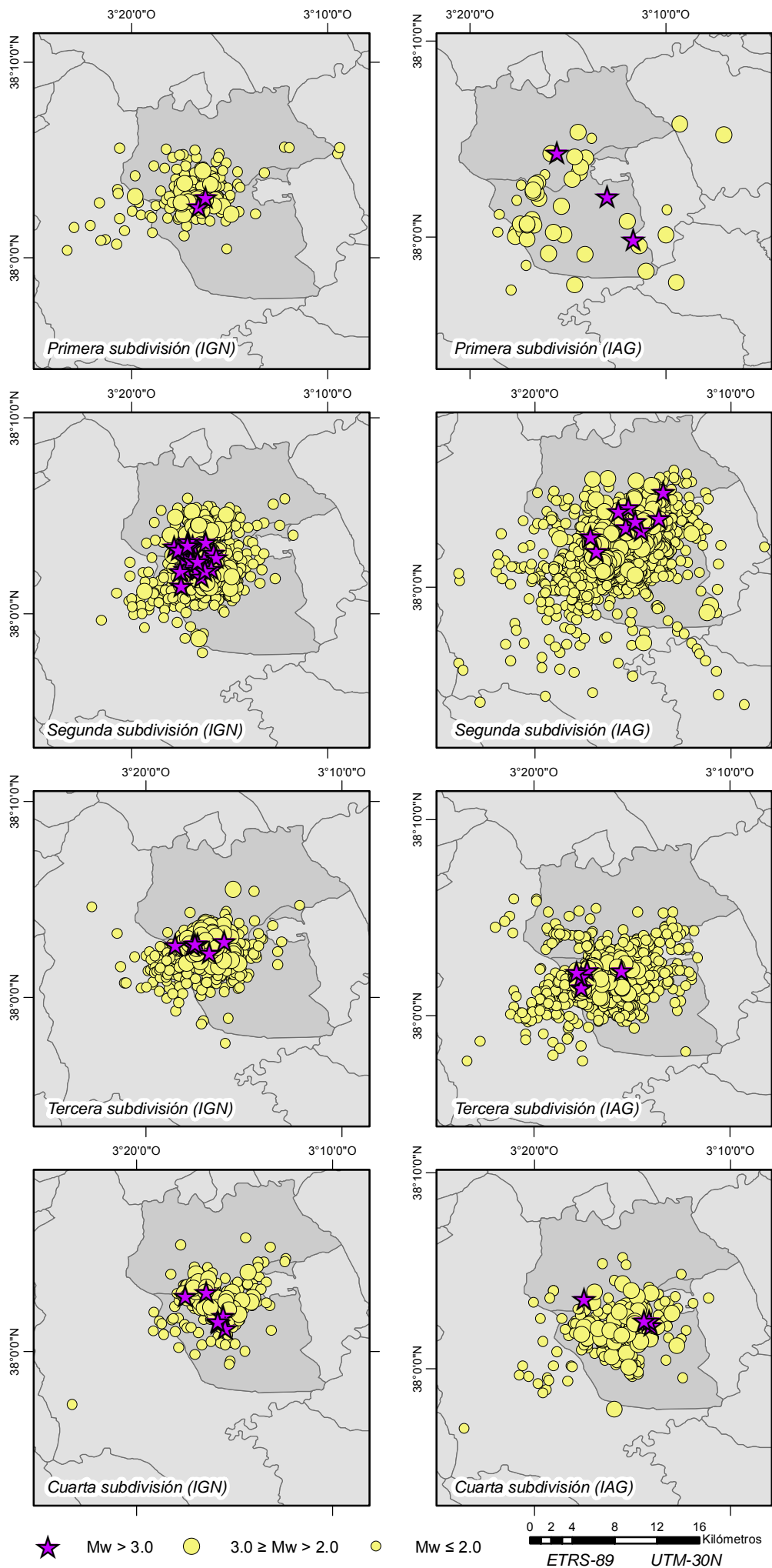


Figura 10. Histogramas de frecuencia diaria de terremotos (barras azules) y magnitudes máximas (cuadrados rojos) y mínimas (triángulos verdes) observadas desde el 21 de Octubre de 2012 hasta el 31 de Octubre de 2013, de las series sísmicas del IGN y del IAG. Se muestran, además, los límites de las etapas elegidas para realizar el estudio (líneas verticales negras). Gráficas con distinta escala.

Distribución geográfica de las subdivisiones sísmicas de Torreperogil-Sabiote



5.2 DATOS DE LA SERIE SÍSMICA DE CASTOR

Para llevar a cabo el cálculo, se ha recurrido a los datos públicos del IGN. Existen otras instituciones que poseen estaciones sísmicas en torno a la plataforma marina (cuyos datos no son públicos), como pueden ser las del Observatorio del Ebro, cuyo catálogo contiene unos 1002 eventos, de los cuales 982 poseen magnitud asignada, desde el 5 de Septiembre hasta el 15 de Octubre de 2013 (Cesca *et al.* 2014).

En este trabajo, únicamente se ha hecho uso de los datos públicos del IGN. Esto supone una desventaja respecto a otros estudios en los que se ha tenido acceso a datos locales ya que, a diferencia de lo que ocurre con la red local, el IGN posee una red de estaciones asimétricamente repartidas en torno a la plataforma marina (Figura 26). Además, cuenta con un escaso número de estaciones sísmicas en torno a dicha plataforma, encontrándose, a su vez, a gran distancia de la misma (la estación sísmica más cercana se sitúa a 55 km). Todo ello, da lugar al registro de menor número de eventos y mayor dispersión e incertidumbre en los datos.

El catálogo público, descargado a través de la página web oficial del IGN en Septiembre de 2014, contiene 552 eventos con magnitud asignada, desde el 5 de Septiembre hasta el 29 de Octubre del 2013. El área de estudio está comprendida entre las latitudes $40.30^{\circ}N/40.48^{\circ}N$ y longitudes $0.60^{\circ}E/0.84^{\circ}E$.

La serie completa alcanza una magnitud máxima de 4.2 y mínima de 1.2, siendo la profundidad máxima registrada de 20 km.

Para el cálculo de los parámetros sísmicos, existen diversas posibilidades de dividir la serie sísmica completa en subseries menores. En este proyecto, se han llevado a cabo dos tipos de división: la primera, hace una distinción entre el periodo de inyección y el de postinyección; y la segunda, está formada por cuatro etapas diferenciadas por cambios en la frecuencia de sismos.

Primera división: durante y postinyección (Figura 11)

Se pretende ver si existe algún parámetro sísmico que proporcione alguna clave importante que permita discriminar entre sismicidad inducida y disparada por la inyección. Así mismo, se quiere analizar si alguno de los parámetros estudiados puede dar algún tipo de información valiosa para predecir, en un corto periodo de tiempo, qué se espera que ocurra si se iniciara o continuara una inyección de gas en un emplazamiento.

*Segunda división: cuatro etapas (Figura 11)**Primera etapa*

Comienza el 5 de Septiembre de 2013, aunque es a partir del día 9 cuando empieza a observarse en la zona un ascenso prolongado de la sismicidad. El día 13 se registraron 24 terremotos, llegando a alcanzar M_w de 3.2. Este aumento de la sismicidad y magnitud comienza a descender de manera prolongada tras el cese de la inyección, hasta registrar a penas 3 sismos el día 23. El criterio seguido para separar esta primera etapa de la segunda es el cambio significativo de número de terremotos diarios que se produce del 23 al 24 de Septiembre (de 3 a 21 sismos). Los eventos registrados durante esta primera etapa se consideran consecuencia de la inyección de gas. Aunque fue el día 16 cuando se produjo el cese, el fluido tarda unos días en migrar y dispersarse por el subsuelo, por lo que la microsismicidad registrada los días posteriores al cese continúa definiéndose como sismicidad inducida.

Segunda etapa

El ascenso significativo del número de terremotos el 24 de Septiembre es consecuencia de la activación del sistema de fallas de la zona, debido presuntamente a la inyección, llegando a registrar M_w de 3.7. En los tres siguientes días se observó un descenso importante de la frecuencia diaria de sismos, hasta a penas registrar ninguno el 28 de Septiembre.

Tercera etapa

Esta subserie comienza el 29 de Septiembre con un gran cambio en el número de terremotos debido a una nueva activación del sistema de fallas (se llegaron a registrar más de 50 eventos). Esta etapa es en la que mayor número de terremotos se observa y mayores frecuencias y magnitudes se alcanzan (superando, durante 3 días, 50 terremotos diarios y rozando M_w en torno a 4.0). Tras el 4 de Octubre, la sismicidad desciende notablemente, llegando a no registrar ningún terremoto el día 10.

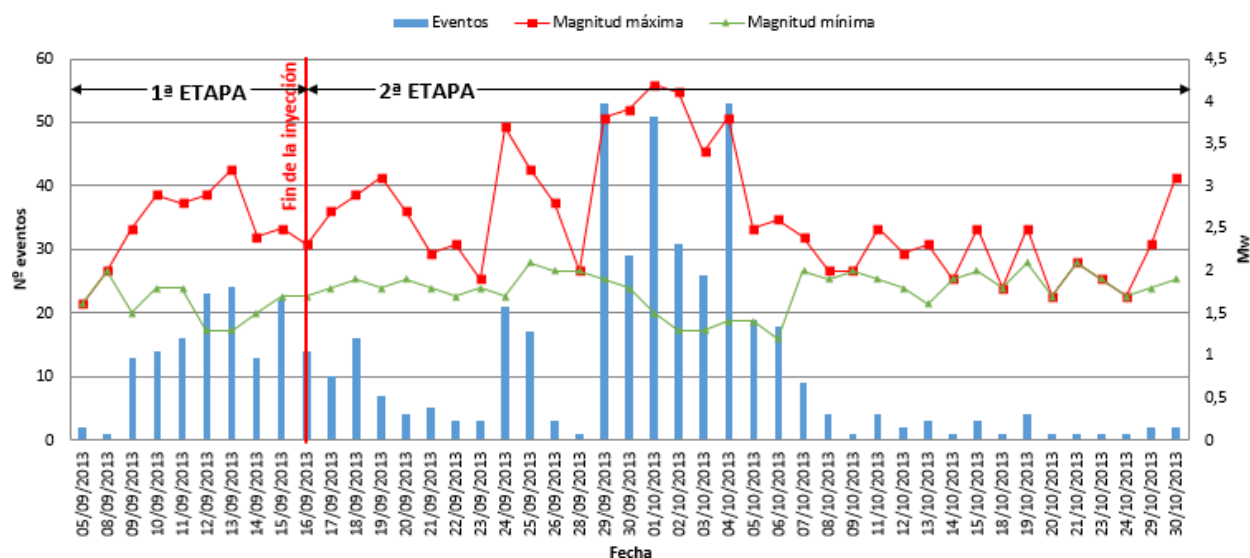
Cuarta etapa

Finalmente, a partir del día 10 de Octubre, la sismicidad registrada no llega a más de 4 terremotos diarios. Por tanto, este estudio considera la cuarta etapa distinta a la tercera, debido a la baja sismicidad que presenta comparado con la etapa anterior.

Tabla 2. Esquema de las características generales de la serie sísmica de Castor y sus etapas.

Serie Sísmica	Fecha Inicio	Fecha Fin	Días	Nº Eventos	M _w Min	M _w Máx	ProfMin(Km)	ProfMax(Km)
DURANTE INYECCIÓN	05/09/2013	16/09/2013	12	142	1,3	3,2	0	13
DESPUÉS INYECCIÓN	17/09/2013	30/10/2013	44	410	1,2	4,2	0	20
1ª SUBDIVISIÓN	05/09/2013	23/09/2013	19	190	1,3	3,2	0	13
2ª SUBDIVISIÓN	24/09/2013	28/09/2013	5	42	1,7	3,7	0	10
3ª SUBDIVISIÓN	29/09/2013	09/10/2013	11	294	1,2	4,2	0	20
4ª SUBDIVISIÓN	10/10/2013	30/10/2013	21	26	1,6	3,1	1	8

División de la serie sísmica durante y postinyección



División de la serie sísmica en 4 etapas

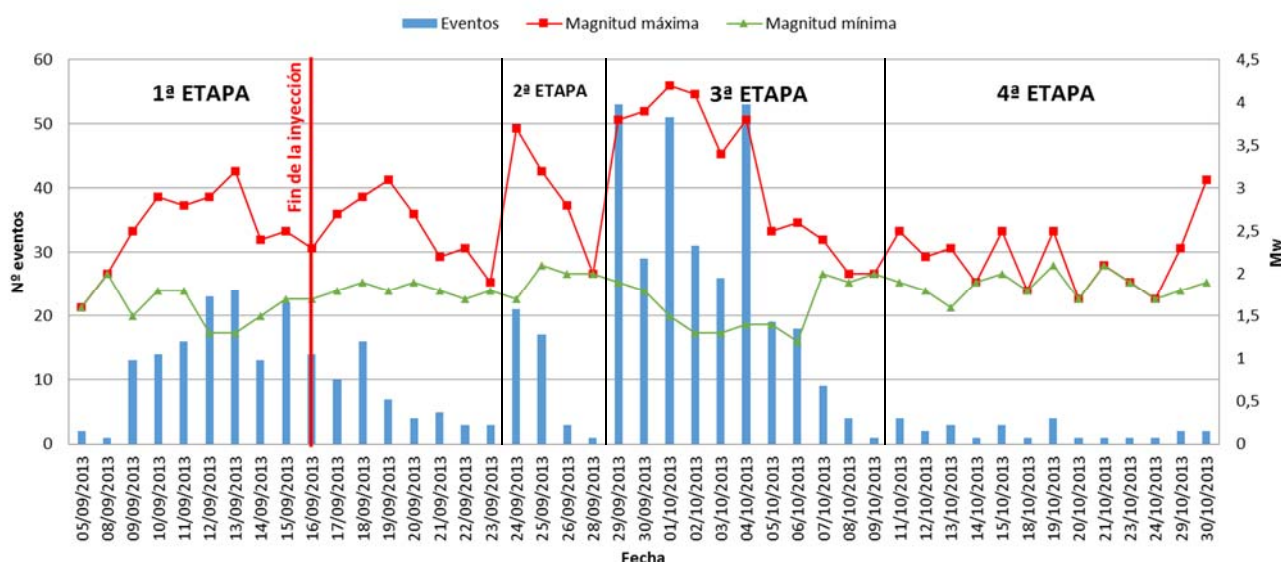
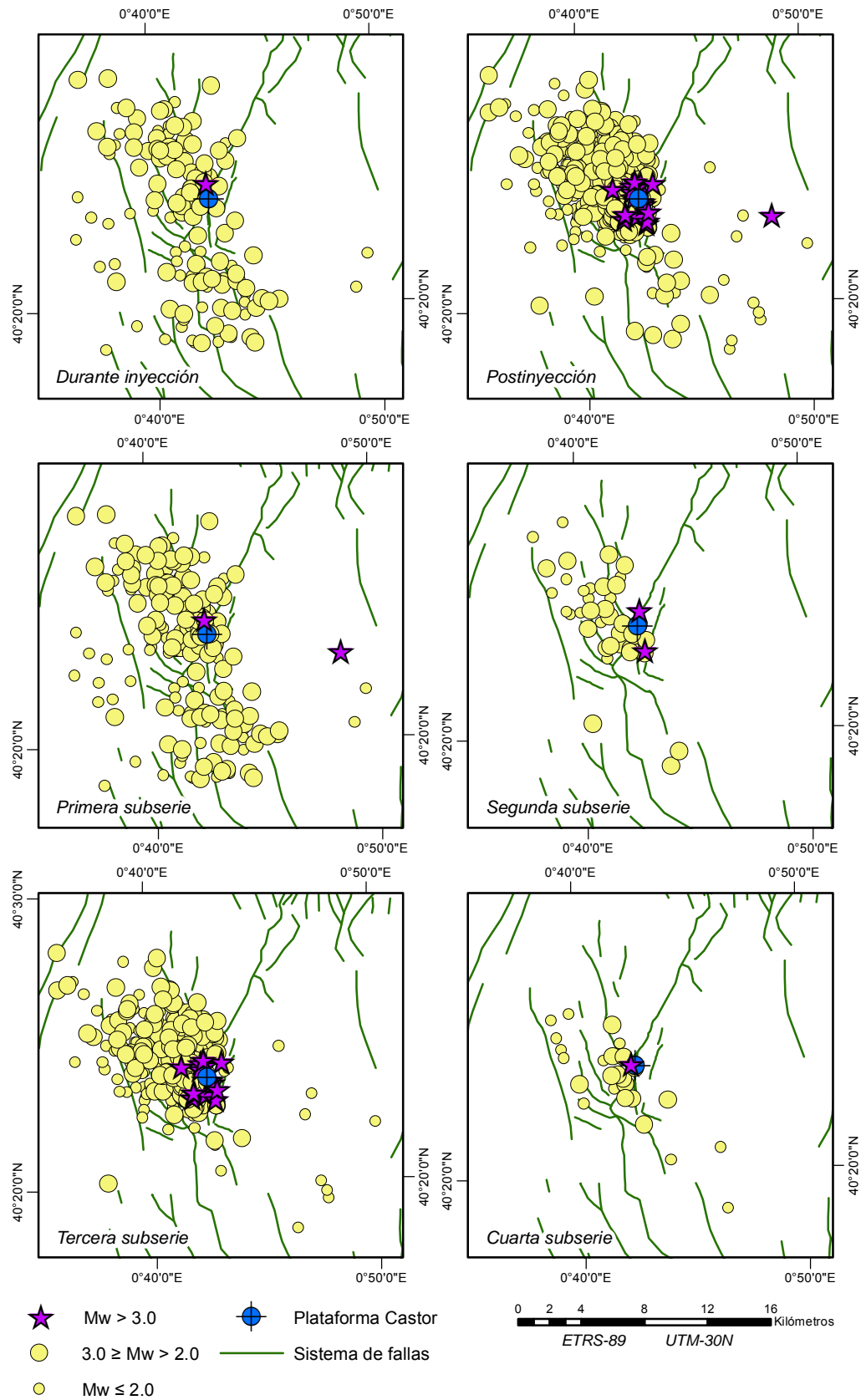


Figura 11. Histogramas de frecuencia diaria de terremotos (barras azules) y magnitudes máximas (cuadrados rojos) y mínimas (triángulos verdes) observadas desde el 5 de Septiembre hasta el 30 de Octubre de 2013. Se muestran, además, las subseries en las que se ha dividido la serie sísmica: durante y postinyección (gráfica superior), y en 4 etapas (gráfica inferior). Datos sísmicos procedentes del catálogo del IGN para un recuadro de latitudes 40.30°N/40.48°N y longitudes 0.60°E/0.84°E.

Distribución geográfica de las subseries sísmicas de Castor



5.3 PREPARACIÓN DE LOS CATÁLOGOS SÍSMICOS

Respecto a la depuración de réplicas y premonitores del catálogo sísmico, tanto en la serie de Torreperogil-Sabiote como en la de Castor no se ha llevado a cabo este proceso, ya que no se pueden considerar los eventos independientes unos de otros en ninguna de las series.

En la serie de Torreperogil-Sabiote no existen claras evidencias de clasificar un terremoto como principal, debido a que se trata de un enjambre sísmico (conjunto de eventos sísmicos registrados en un área específica durante un periodo de tiempo relativamente corto, en los que no se observa un único terremoto que pueda ser definido como el movimiento principal).

En la serie sísmica de Castor, al tratarse de un supuesto origen inducido, es evidente esperar que se genere una cierta microsismicidad en emplazamientos próximos a la plataforma donde se llevaba a cabo la inyección de gas. Si se depurase el catálogo original, esta microsismicidad no se tendría en cuenta. El estudio de los parámetros sísmicos de la microsismicidad producida por procesos antrópicos es muy importante para estimar el futuro comportamiento del subsuelo y la actividad sísmica de la zona.

Los terremotos registrados en ambas series sísmicas son pequeños, con magnitudes menores a 3.9 (en la serie de Torreperogil-Sabiote) y a 4.2 en la serie de Castor. No procede, por tanto, la depuración de ninguno de los catálogos, ya que se eliminarían los eventos que se tratan de analizar en este proyecto.

Por otro lado, las series de Torreperogil-Sabiote y Castor son muy actuales y cuentan con la información completa acerca del tamaño de todos los terremotos, la localización geográfica y el tiempo de registro. Los catálogos usados para el cálculo provienen de una sola fuente, por lo que no existen duplicaciones de eventos en una misma serie sísmica. Finalmente, en el presente estudio no se lleva a cabo ningún tipo de depuración en función de las profundidades, ya que interesan todos y cada uno de los eventos registrados.

Atendiendo al proceso de homogeneización, en este caso y para ambas series, se ha decidido utilizar la M_w (Hanks y Kanamori, 1979), como parámetro único de tamaño en el catálogo. La ventaja de esta escala de magnitud es que no está saturada para grandes terremotos y además tiene una relación directa con la física de la fuente, al derivar del momento sísmico escalar M_0 . Para ello se utilizan diferentes relaciones de regresión, entre la magnitud M_w y los distintos parámetros de tamaño, con el objetivo final de poder convertir cada parámetro de tamaño del catálogo a esta magnitud.

En los catálogos descargados del IGN, los tipos de magnitud observadas son m_{bLg} (magnitud a partir de la amplitud de la fase Lg (López, 2008)) y M_w ; de manera que se pasa de m_{bLg} a M_w usando la conversión de la Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España (IGN-UPM, 2013; Cabañas *et al.* 2014), a través de la siguiente relación:

$$M_w = 0.676 + 0.836 \cdot m_{bLg} \quad (IV)$$

El rango de aplicabilidad de la relación utilizada es $3.0 \leq M \leq 5.1$, no siendo aconsejable extrapolar dicha relación para magnitudes fuera de este rango. El catálogo utilizado cuenta con un número elevado de eventos con magnitudes inferiores a 3.0. Sin embargo, no existe otra correlación mejor para establecer la equivalencia entre ambas magnitudes.

En el catálogo del IAG los tipos de magnitud observados son la magnitud de coda m_c (más conocida como magnitud duración M_D) y M_w . La magnitud coda es una estimación empírica de la magnitud, basado en la observación de que cuanto más grande el terremoto, más largo es el registro sísmico. Se mide la duración del registro, y se convierte a magnitud mediante una relación empírica-logarítmica. Para hacer la conversión a M_w , se usa la relación:

$$M_w = 1.055 * m_c - 0.022 \quad (V)$$

En aquellos casos donde se registró M_w directamente, no se aplicará ningún tipo de conversión.

5.4 APLICACIÓN DEL MODELO GUTENBERG-RICHTER Y ANÁLISIS TEMPORAL DE PARÁMETROS SÍSMICOS

Para obtener los parámetros de la Ley G-R y llevar a cabo el análisis temporal de b y M_c , en este proyecto se opta por hacer uso del programa *ZMAP*. Se trata de un software libre, escrito en la plataforma *MATLAB*, para el análisis sistemático de datos de sismicidad y catálogos sísmicos. *ZMAP* utiliza MAXV como método de ajuste. La base de datos en la que opera es un catálogo de sismicidad, que utiliza los siguientes parámetros de entrada o inputs: tiempo de ocurrencia (dado en formato: año, mes, día, hora y minutos), localización (latitud y longitud), magnitud (cualquiera que sea la escala), y profundidad (km). Además de usar *ZMAP*, se han programado en *Excel* los ajustes del modelo G-R, por MMCC y MAXV.

Para el cálculo de M_c , *ZMAP* proporciona hasta 9 métodos distintos, de los cuales, en este estudio, se han escogido: el de MAXC, debido a que es recomendado para análisis rápidos de M_c (Woessner y Wiemer, 2005); y el método de BC, ya que López (2011) comprobó que existe una relación lineal entre el método EMR y BC, requiriendo este último menor poder de cómputo.

Por otro lado, la representación gráfica de b y M_c facilita el análisis del comportamiento que adquieren ambos parámetros de manera continua con respecto al tiempo dentro de una misma serie. La forma en la que *ZMAP* calcula la variación temporal de dichos parámetros sísmicos se basa en establecer o fijar una ventana temporal, la cual se desplaza a lo largo del tiempo, manteniendo una superposición entre ventanas constante y previamente definida (*overlap*). En este proyecto, tanto el tamaño de la ventana temporal, como el del *overlap*, se definen por un número fijo de eventos. De esta forma, por cada ventana temporal, se tiene un valor del parámetro en cuestión con su respectiva precisión.

Otra forma de definir el tamaño, tanto de la ventana temporal, como del *overlap*, podría ser fijando el número de días, meses u otra unidad de tiempo. Esto sería interesante para estimar el

valor de los parámetros a corto plazo, basándose en los obtenidos en un periodo de tiempo inmediatamente anterior.

Finalmente, existe un input en *ZMAP*, llamado *bootstrap*, que afecta considerablemente al cálculo de los parámetros. El *bootstrap* es un tipo de técnica de remuestreo de datos que permite resolver problemas relacionados con la estimación de intervalos de confianza (Ledesma, 2008).

5.5 APLICACIÓN DEL MODELO ETAS

El cálculo de los parámetros del modelo ETAS se ha realizado a través de un programa del paquete SASEis2006 (Utsu y Ogata, 1997), escrito en Fortran77. Dicho programa usa el método de MAXV para llevar a cabo el ajuste del modelo.

Son 5 los inputs que hay que introducir en el programa, además del catálogo sísmico:

- Fecha inicio: Fecha, en formato decimal, a partir de la cual se consideran para el cálculo los eventos del catálogo.
- Fecha fin: Fecha, en formato decimal, hasta la cual se consideran para el cálculo los eventos del catálogo.
- Precursory: Intervalo de tiempo anterior a la Fecha inicio de la serie (o subserie sísmica), fijado por el usuario, en el que los eventos se consideran premonitores. Da una idea del nivel de sismicidad que hay en la zona, previo a la ocurrencia de la serie (o subserie) que se desea estudiar. Este parámetro de entrada o input es muy importante ya que afecta de manera considerable los valores de los resultados en función del valor que se le asigne. Por tanto, en el presente proyecto, se decide fijarlo a cero, con el objetivo de no distorsionar el análisis de cada subserie. En otras palabras, se estudia cada etapa de manera independiente, de forma que el valor del *precursory* no influya en los parámetros resultantes.
- Magnitud mínima de completitud M_c : los valores que se toman son los que se obtienen como resultado del cálculo con *ZMAP*.
- Magnitud de corte M_r : el modelo calcula el número de réplicas que un evento de magnitud mayor o igual a la M_r puede tener. Para los cálculos del presente proyecto, se asume que todos los eventos (de magnitud mayor o igual a M_c) pueden tener réplicas, por lo que el valor de M_r siempre es igual al de M_c .

Por otro lado, el catálogo sísmico ha de tener la siguiente información: identificador del evento (único para cada terremoto y ordenado de más antiguo a más reciente), longitud, latitud y profundidad (negativa y en km), magnitud, fecha (en formato decimal, resultado de la suma de fecha y hora), y año, mes y día de registro.

6 RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 ANÁLISIS DE LA SERIE SÍSMICA DE TORREPEROGIL-SABIOTE

6.1.1 Estimación de los parámetros de recurrencia (Ley de Gutenberg-Richter)

A continuación se muestran los valores de los parámetros obtenidos tras los ajustes de la Ley G-R en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG), y sus correspondientes subseries (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de los parámetros de la relación G-R en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG), para la serie completa y sus subseries. Método de cálculo: BC.

	IGN			IAG		
Serie Sísmica	b	a	Mc	b	a	Mc
COMPLETA	$1,22 \pm 0,15$	5,28	$1,7 \pm 0,2$	$0,64 \pm 0,06$	3,9	$0,39 \pm 0,2$
1ªSUBDIVISION	$1,66 \pm 0,23$	4,95	$1,8 \pm 0,1$	$1,57 \pm 0,49$	5,3	$2,40 \pm 0,2$
2ªSUBDIVISION	$1,20 \pm 0,14$	5,00	$1,8 \pm 0,2$	$0,71 \pm 0,05$	3,8	$0,43 \pm 0,1$
3ªSUBDIVISION	$1,27 \pm 0,24$	4,83	$1,8 \pm 0,2$	$0,82 \pm 0,15$	3,6	$0,72 \pm 0,4$
4ªSUBDIVISION	$1,21 \pm 0,18$	4,29	$1,8 \pm 0,1$	$0,83 \pm 0,43$	3,6	$1,50 \pm 0,6$

Los resultados de los ajustes mediante MAXC (ZMAP), MMCC (Excel) y MAXV (Excel), se presentan en Anexos (Tabla 7 y Figura 23 y Figura 24). Dichos resultados son muy similares a los obtenidos por BC.

Se puede ver en la Tabla 3 que, en ambas series sísmicas (IGN e IAG), la primera subserie posee un valor de b que se diferencia de la media del resto (tanto de las demás subseries como de la serie sísmica completa). Esta diferencia se ve de forma más clara en la serie del IAG, donde b , en la primera etapa, es $1,57 \pm 0,49$, mientras que en las otras subseries se encuentra comprendido en el intervalo 0.6-0.8 (más la desviación). Además, en el caso de la serie del IAG, esta diferencia también se percibe en el parámetro a , siendo 5.3 en la primera subserie, e inferior a 4.0 el valor medio del resto de las subseries.

Esta diferencia de los valores de los parámetros en la primera subserie es debido, en parte, a la M_c escogida: en la serie del IGN este parámetro se mantiene constante, para todas las etapas analizadas, en valores de $1,7-1,8 \pm 0,1-0,2$; sin embargo, en la serie del IAG, M_c varía enormemente dependiendo de la subserie, ya que depende, a su vez, del número de terremotos registrados en cada etapa: cuanto mayor es el registro de eventos, M_c es generalmente menor. De esta forma, se pone de manifiesto que el valor de M_c es muy sensible a la muestra analizada.

En la primera etapa, el valor de b es más alto que en el resto de las etapas, debido al mayor número de terremotos de baja magnitud registrados respecto al resto de las subseries. Por otro

lado, en la serie sísmica del IAG, se obtiene un valor de M_c muy alto debido a la falta de datos para estimar la completitud de la subserie. Esto afecta al valor de la pendiente de la recta, al basarse sólo en los terremotos de magnitudes grandes para llevar a cabo el ajuste.

Por otro lado, el mayor número de eventos del catálogo del IAG hace que las desviaciones, en las series completas, sean menores que las del IGN. En las distintas etapas se observa que, en función del número de terremotos de cada subserie, las precisiones aumentan o disminuyen. En otras palabras, en la primera etapa ambas subseries sísmicas (IGN e IAG) registraron un número menor de eventos, lo que hace que las desviaciones sean mayores que las del resto de las etapas. La segunda subserie, en cambio, es la que más terremotos registró, lo que se traduce en los valores de las desviaciones más bajos de las series sísmicas.

Según los mapas de distribución de los parámetros b y a de la Ley G-R para toda la península, realizado por el IGN (1992), el valor que toma b en la zona donde se produjo la serie sísmica, es de 0.8-0.9 aproximadamente, siendo el valor de a del orden de 3.0-4.0 (ver Figura 22 de Anexos). En este estudio, para la serie completa del IGN se ha obtenido un valor de b de 1.22 ± 0.15 , y de a de 5.28. En el caso de la serie del IAG, el valor de b es 0.64 ± 0.06 , siendo 3.9 el de a .

Observando las soluciones gráficas de la Figura 12, se puede comprobar que ajustan mejor los datos de la serie sísmica del IGN que los de la del IAG. En la serie del IAG se sobrestima el número de eventos de magnitudes altas, al establecer una M_c posiblemente inferior a la adecuada. Por ello, en todos los ajustes, salvo en el de la primera subserie (donde se estableció una M_c de 2.4), el valor de b refleja una pendiente más baja de la realista. Sin embargo, todas las gráficas de la serie del IGN ajustan adecuadamente, salvo la de la primera subserie, donde la pendiente es anormalmente alta, subestimándose el número de eventos de magnitudes altas.

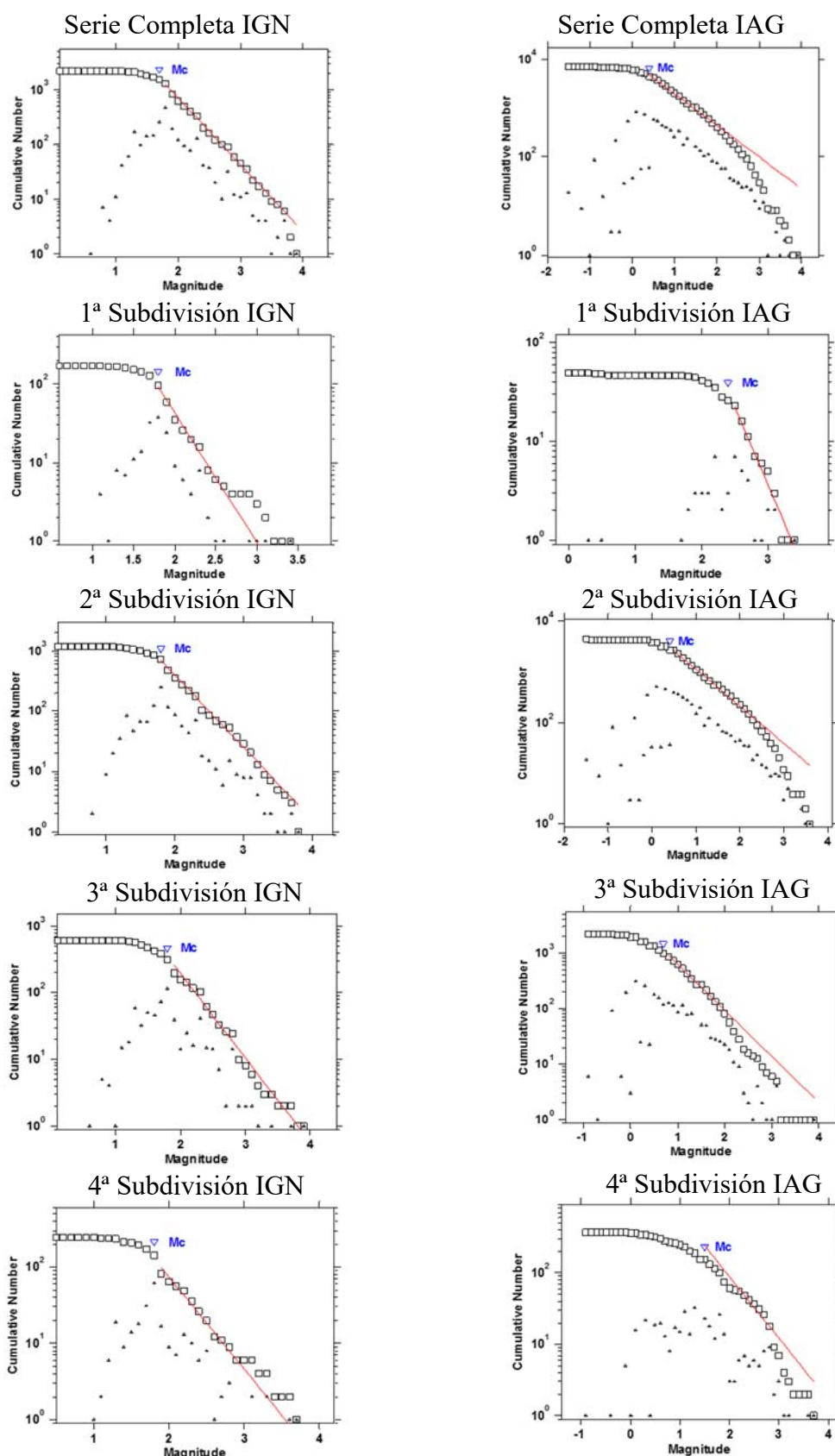


Figura 12. Relación G-R de las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN y del IAG), para la serie completa y sus subseries. Método de cálculo: BC. El eje de ordenadas está representado por el logaritmo del número acumulado de eventos, y el eje de abscisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala.

6.1.2 Análisis de la variación temporal de b y M_c

Serie completa (Figura 13)

En el transcurso de las series sísmicas del IGN y del IAG, existen intervalos de mayor y menor frecuencia de terremotos (sobre todo en el caso de la serie del IAG). Esto hace que sea difícil escoger el tamaño de las ventanas temporales para graficar la variación de los parámetros. En los casos donde la frecuencia de eventos es alta, lo ideal es escoger ventanas temporales grandes que simplifiquen la abundancia de datos. Sin embargo, esto causa, en las etapas de frecuencias bajas, escaso nivel de detalle e incluso, en ocasiones, falta de datos para una posible representación gráfica (como ocurre en las etapas primera y cuarta de ambas series sísmicas).

Por tanto, el tamaño más idóneo de la ventana temporal es aquel en el que se omita la menor información posible en las etapas de baja frecuencia de terremotos y donde se simplifique lo más posible en las etapas de alta frecuencia. De esta forma, las gráficas que se muestran en la Figura 13, son el resultado óptimo de numerosas pruebas mediante diferentes combinaciones de inputs. Se ve cómo en la primera y cuarta subserie apenas se representa gráficamente la variación temporal de los parámetros, y cómo, en las etapas segunda y tercera, la abundancia de datos conlleva a escasa suavidad en la representación.

Por otro lado, la representación temporal de los parámetros en la serie sísmica del IGN es más legible y fácil de analizar, ya que cuenta con menor número de eventos y las diferencias de frecuencia diaria de sismos entre intervalos es menor que en la serie del IAG.

Respecto a las precisiones, son mayores en aquellos intervalos donde existe mayor abundancia de datos, ocurriendo lo contrario en aquellos rangos de menor frecuencia de terremotos.

Atendiendo a la variación temporal de b en la serie sísmica del IGN, se obtienen valores en torno a 1.0 en los intervalos de mayor frecuencia de terremotos. Sin embargo, cuando dicha frecuencia disminuye, se observa un aumento del valor del parámetro, rondando valores de 1.6-1.8. Por otra parte, en aquellos intervalos donde se registra mayor número de terremotos diarios, es cuando se observan las magnitudes más altas de la serie. Por tanto, es coherente que el valor de b descienda con el aumento de la frecuencia, ya que es cuando se registran mayor número de terremotos de magnitudes grandes.

Sin embargo, la variación temporal de b en la serie sísmica del IAG no es tan acusada como en la del IGN, aunque la gran cantidad de datos hace que la representación gráfica sea confusa y difícilmente legible (se empastan los valores, no se distinguen bien las desviaciones, etc.). Se observa de nuevo el descenso del valor de b con el ascenso de la frecuencia, aunque de manera más leve que en la serie del IGN, rondando a lo largo de toda la serie valores entre 0.8 y 1.0 aproximadamente.

El valor de M_c en la serie sísmica del IGN se mantiene prácticamente constante en valores aproximados a 1.8. En cambio, la serie del IAG muestra valores muy distintos para cada una de las subseries.

Con el objetivo de obtener mayor grado de detalle en la evolución temporal de b y M_c , y evitar intervalos confusos o con falta de datos, se ha analizado cada subserie sísmica por separado,

con tamaños de ventanas temporales distintos para cada una de ellas, adecuándose a las características de las mismas.

Primera subserie (Figura 14)

El valor de b en la subserie del IGN muestra un descenso paulatino con el tiempo, a medida que aumentan las magnitudes de los terremotos, acabando en valores próximos a 1.8. Por el contrario, el valor de M_c se mantiene constante a lo largo de toda la subserie, con valores de 1.8.

Por otro lado, en la subserie del IAG, la representación gráfica de b en función del tiempo que se obtiene mediante *ZMAP* no es coherente ni fiable, debido a los valores del parámetro que se alcanzan y la tendencia que adquiere. Esto puede ser debido al escaso número de datos que posee esta etapa. Respecto al parámetro M_c , posee un comportamiento constante a lo largo de toda la subserie, con valores de 2.6-2.8.

Segunda subserie (Figura 15)

En la subserie del IGN el valor de b asciende conforme decrece la frecuencia de sismos, como ocurría en la serie completa. Sin embargo, en el caso de la subserie del IAG, el valor del parámetro se mantiene prácticamente constante en 0.9.

El valor de M_c en la subserie del IGN se mantiene en 1.8 aproximadamente. En cambio, en la del IAG se ve cómo dicho valor baja, desde 2.6-2.8 en la primera etapa, hasta 0.4 en la segunda, valor que ronda durante toda la subserie.

Respecto a las precisiones, se observa como son mayores en intervalos de frecuencias altas de sismos, y menores, en frecuencias bajas.

Se puede comprobar que, tras llevar a cabo la división de la serie sísmica en 4 etapas, las representaciones gráficas son más fáciles de interpretar y analizar, ya que poseen una tendencia más continua y no se empastan los datos.

Tercera subserie (Figura 16)

Al igual que se refleja un cambio considerable en los valores de b al pasar de la primera a la segunda etapa, no ocurre lo mismo con las etapas segunda y tercera, donde el parámetro toma valores muy similares al final y comienzo de las respectivas subseries.

En la subserie del IGN se observa de nuevo cómo decrece el parámetro conforme aumenta la frecuencia de eventos, y cómo vuelve a ascender cuando decae el número de terremotos diarios. En la subserie del IAG destaca, a primera vista, las altas desviaciones que se obtienen en los intervalos de baja frecuencia de terremotos.

Finalmente, el valor de M_c en la subserie del IGN presenta más discontinuidades que en el resto de las etapas, aunque continúa en una media de 1.7-1.8. En la subserie del IAG, existen grandes diferencias del valor del parámetro en función de la frecuencia de sismos.

Cuarta subserie (Figura 17)

Finalmente, la cuarta etapa transcurre en un periodo relativamente largo de tiempo registrando un número relativamente pequeño de eventos, si lo comparamos con el resto de las etapas. Este hecho hace que en las gráficas puedan aparecer “huecos”, debido a falta de datos en determinados momentos de la etapa.

En la subserie del IGN, b toma un valor medio en torno a 1.6, y la M_c se mantiene constante en 1.8. En la del IAG, b desciende progresivamente con el tiempo, llegando a observarse falta de datos en ciertos intervalos de la etapa. Respecto al valor de M_c , se observa al principio de la subserie un comportamiento estable, con valores en torno a 1.1, seguido de un ascenso significativo. Hay que destacar las grandes incertidumbres que se obtienen para este parámetro.

A través del análisis temporal de b y M_c , se puede ver que los valores resultantes del ajuste del modelo G-R coinciden con los que adquieren dichos parámetros en los intervalos de mayor frecuencia de terremotos de la serie sísmica.

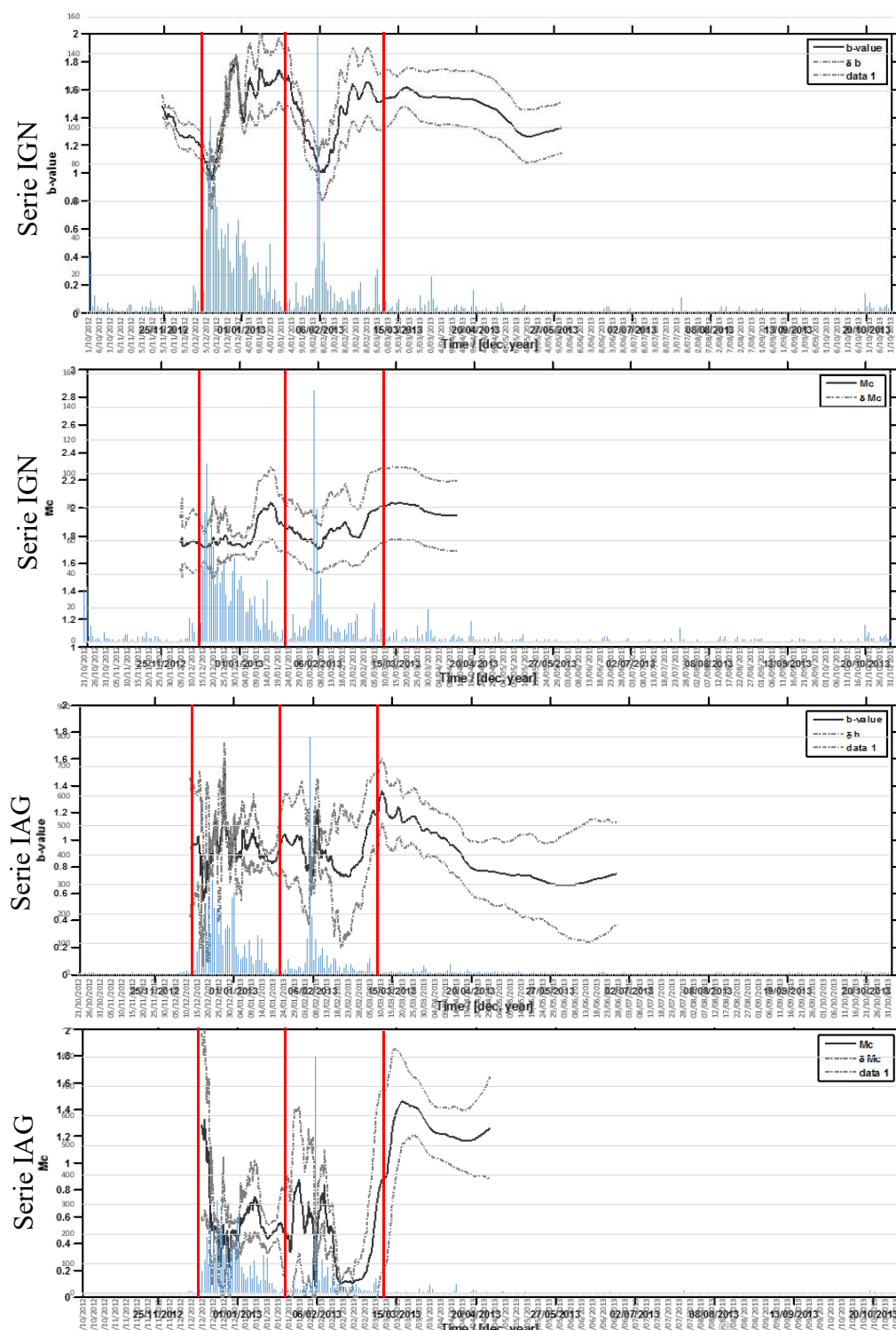


Figura 13. Variación temporal de los parámetros b y M_c en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). Las líneas rojas muestran los límites de las cuatro subseries. Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abscisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala.

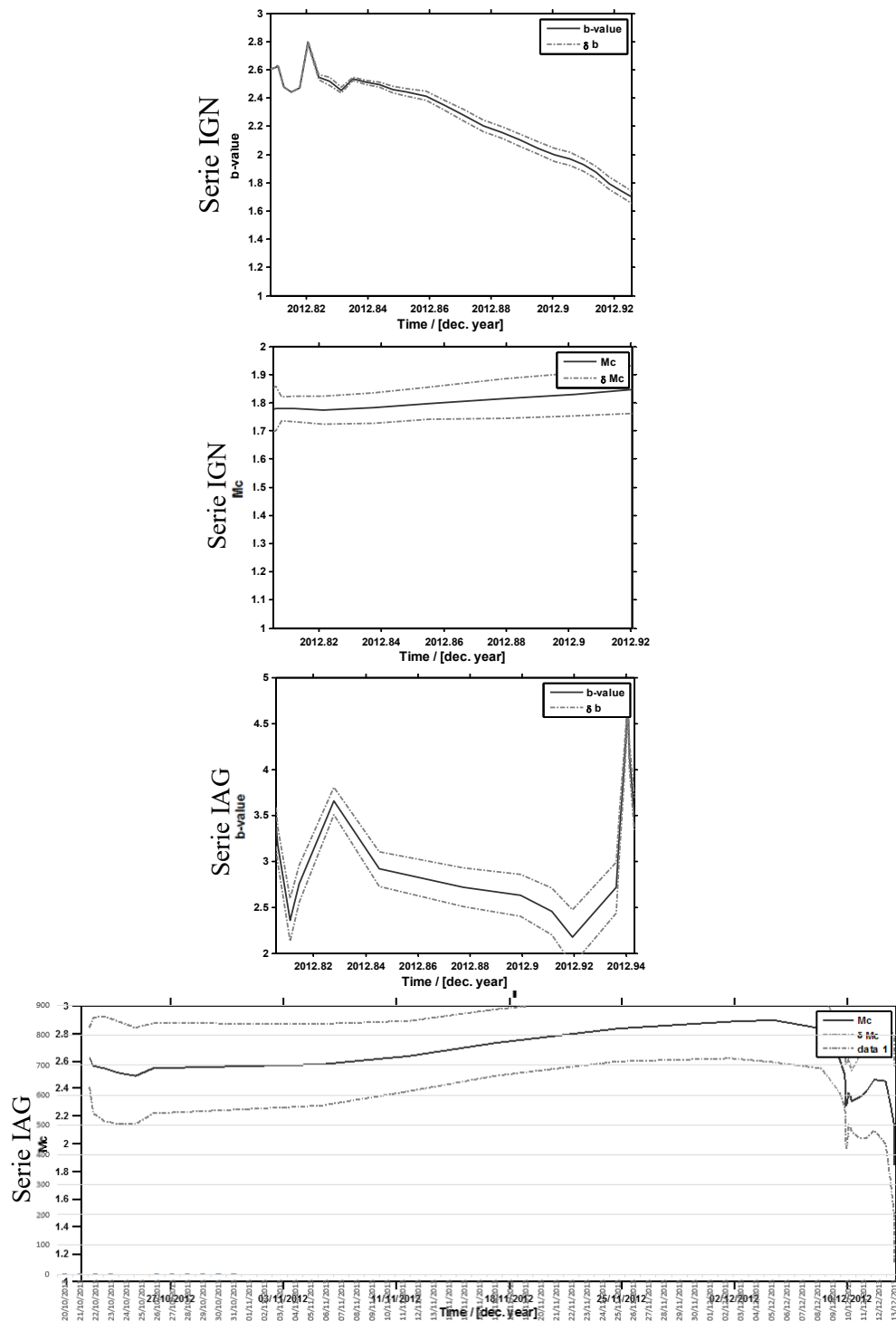


Figura 14. Variación temporal de b y M_c en la 1ª etapa en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abscisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala.

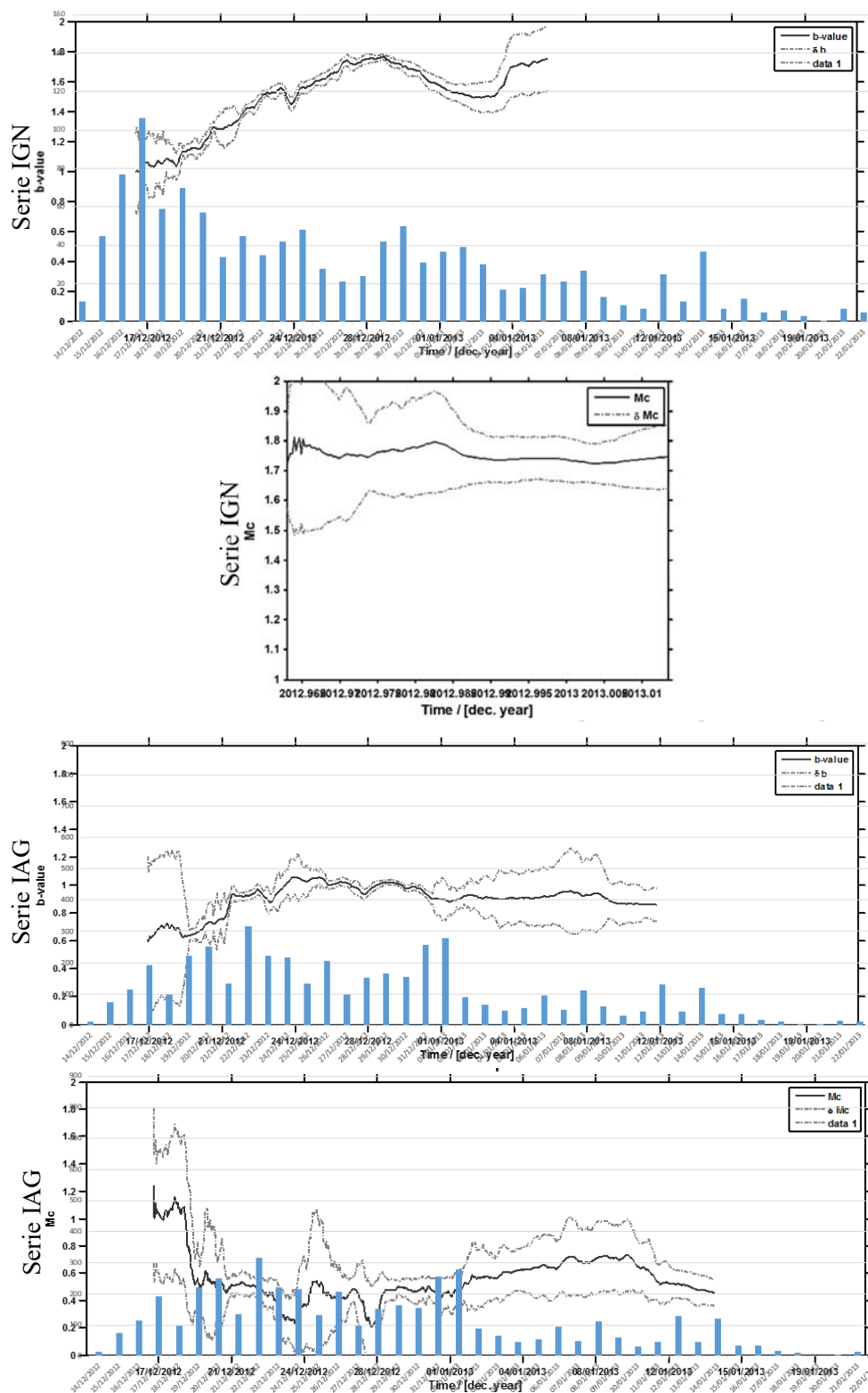


Figura 15. Variación temporal de b y M_c en la 2ª etapa en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abcisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala.

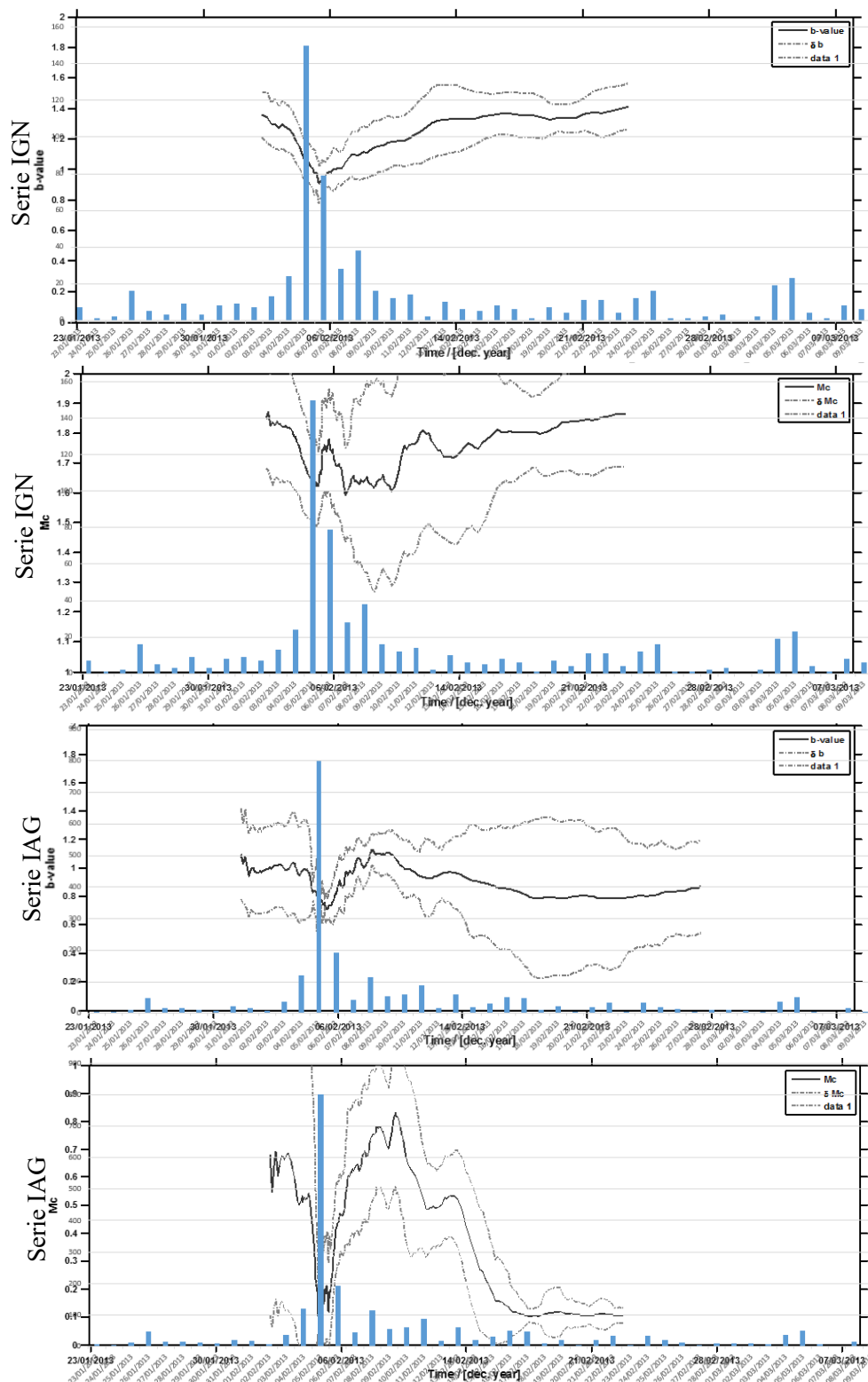


Figura 16. Variación temporal de b y M_c en la 3ª etapa en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abcisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala.

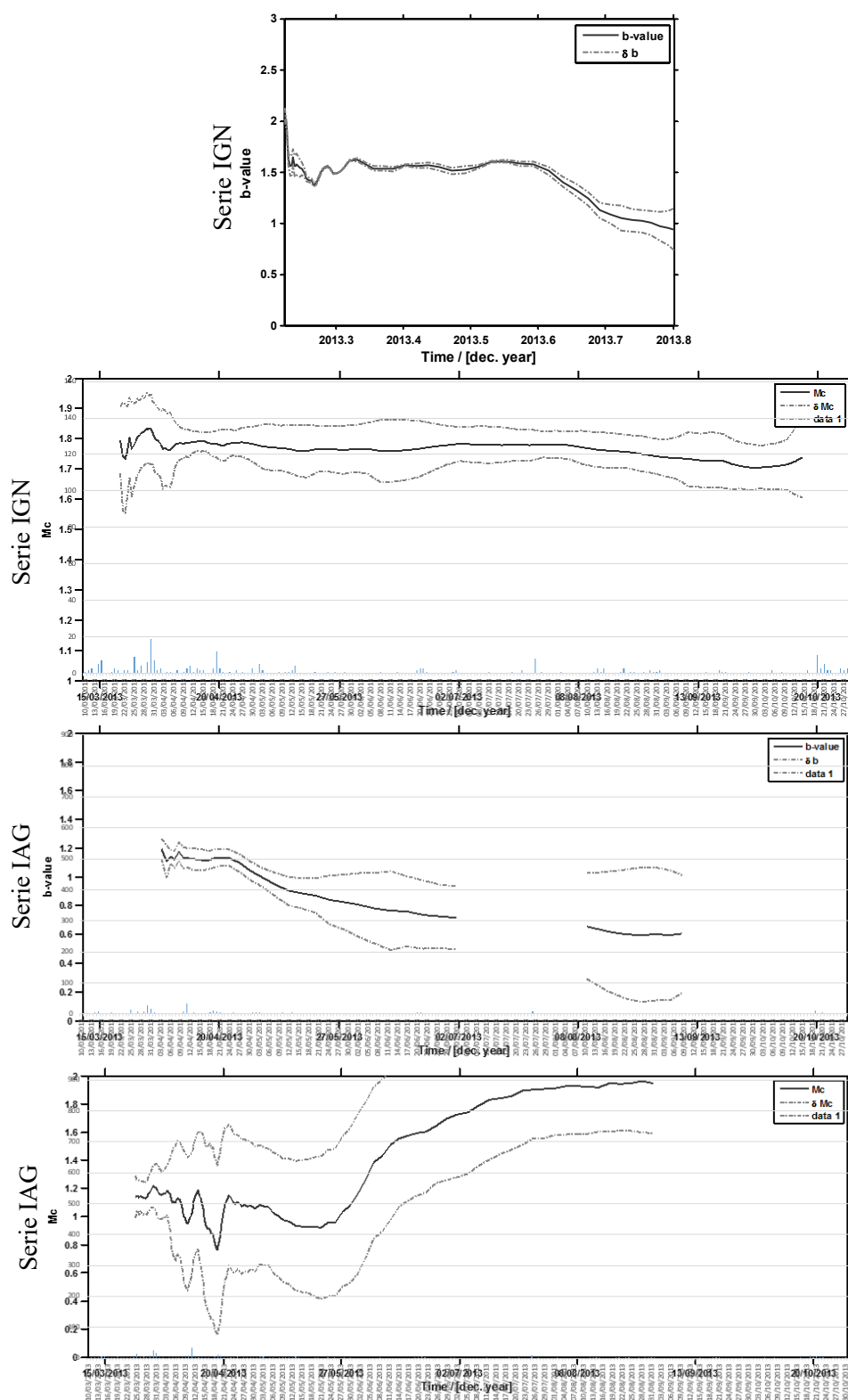


Figura 17. Variación temporal de b y M_c en la 4ª etapa en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abscisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala.

6.1.3 Decaimiento de réplicas: ajustes al modelo ETAS

A continuación se muestran los valores de los parámetros obtenidos tras el ajuste del modelo ETAS en la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote (Tabla 4). En Anexos (Figura 27) se encuentran los histogramas donde se comparan los resultados de la serie del IGN y la del IAG.

Tabla 4. Valores de los parámetros obtenidos tras los ajustes del modelo ETAS en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). Sin precursory.

	Parámetros ETAS_Serie IGN					
Serie Sísmica	μ	K	c	α	p	Mc
COMPLETA	0,0515	0,0476	0,0031	0,9920	1,1599	1,7
1ª SUBDIVISIÓN	0,4016	0,0596	0,0125	0,7775	1,2969	1,8
2ª SUBDIVISIÓN	1,3627	0,0505	0,0021	1,0116	1,1513	
3ª SUBDIVISIÓN	1,5725	0,0292	0,0028	1,2715	1,2510	
4ª SUBDIVISIÓN	0,1448	0,0758	0,0718	1,1936	1,2962	
	Parámetros ETAS_Serie IAG					
Serie Sísmica	μ	K	c	α	p	Mc
COMPLETA	0,0674	0,0531	0,0011	0,0000	1,2174	0,4
1ª SUBDIVISIÓN	0,1619	0,0956	0,0587	0,0000	1,3758	2,4
2ª SUBDIVISIÓN	1,5469	0,0513	0,0013	0,1767	1,2130	0,4
3ª SUBDIVISIÓN	2,1870	0,0506	0,0017	0,0261	1,2420	0,7
4ª SUBDIVISIÓN	0,1414	0,0602	0,0248	0,7545	1,1766	1,5

El parámetro μ (tasa de sismicidad de fondo), presenta valores similares en la primera y cuarta subserie, donde la frecuencia de sismos es muy baja (ruido). Dichos valores se diferencian notablemente de los de la segunda y tercera subserie, donde la frecuencia de terremotos es mucho más alta. Por tanto, la tasa de sismicidad de fondo es mayor en las etapas intermedias de la serie sísmica. El valor de μ para la serie completa es, como se puede observar, mucho más pequeño si lo comparamos con los valores obtenidos en las distintas subseries. Esto indica que en dicho emplazamiento hay una tasa de sismicidad de fondo muy baja, afirmación coherente sabiendo que en la zona donde ocurrieron los terremotos está catalogada como de baja peligrosidad y actividad sísmica.

Respecto al valor de K , que representa la productividad de un evento de magnitud umbral (en este estudio se establece en M_c), generalmente es mayor cuando M_c aumenta. En el caso de la serie del IGN, se podría decir que un terremoto de magnitud 1.8 es más productivo en la cuarta etapa y menos en la tercera, siendo similar en la primera y la segunda.

El parámetro c afecta de forma inversa a la tasa de réplicas, de manera que cuanto menor es dicho parámetro, significa que existen generalmente un mayor número de réplicas inmediatamente después del terremoto. En la primera y cuarta subserie se observa que la c es mayor que en la segunda y tercera, lo que significa que en las dos etapas intermedias de la serie, el número de réplicas es más alto tras el terremoto principal.

El parámetro α nos da una idea de la eficiencia de magnitud de un terremoto de generar réplicas. Los valores obtenidos son bajos debido a que se trata de un enjambre sísmico.

Finalmente, se puede comprobar que p , o tasa de decaimiento de las réplicas, adquiere valores cercanos a 1 (valor que establecía Omori en su fórmula original), mostrando valores más altos aquellas subseries donde el número de réplicas decrece más rápidamente en el tiempo.

La solución gráfica correspondiente a la tasa y parámetros obtenidos se muestra en la Figura 18. La tasa de terremotos calculada para toda la serie sísmica muestra un mejor ajuste en la serie sísmica del IAG que en la del IGN. En ambas, la tasa calculada se queda por debajo de la real, sobre todo en las etapas intermedias.

Al ajustar el modelo a tan sólo los datos de la primera subserie, la extrapolación de la tasa calculada (línea roja), se diferencia significativamente a la real (línea negra), ya que el cálculo se basa en escasos registros y poco representativos de la sismicidad posterior. En la subserie del IGN la extrapolación queda por debajo de la tasa real. En cambio, en la serie del IAG, en el periodo de la segunda y tercera subserie queda por debajo, pero a partir de la cuarta etapa, por arriba.

En la segunda etapa, se puede ver que el modelo ajusta perfectamente a los datos en ambas series sísmicas (las líneas verticales discontinuas muestran el intervalo temporal en el que se calculan los parámetros). Sin embargo, ocurre también en ambas, que se sobrestima la última parte de la serie sísmica y se subestima la primera. Este hecho es más destacado en la serie del IGN.

Los datos de la tercera subserie muestran un buen ajuste al modelo, observando, además, que la extrapolación es muy cercana a la tasa real de la segunda etapa, quedando la primera y cuarta sobrestimadas. Esta sobrestimación es mayor en la serie del IGN.

Finalmente, en la cuarta etapa se puede ver que el ajuste no es tan preciso como el del resto de las etapas, posiblemente debido a la escasez de datos. La extrapolación de la tasa queda sobrestimada en el resto de la serie, sobre todo en la primera etapa.

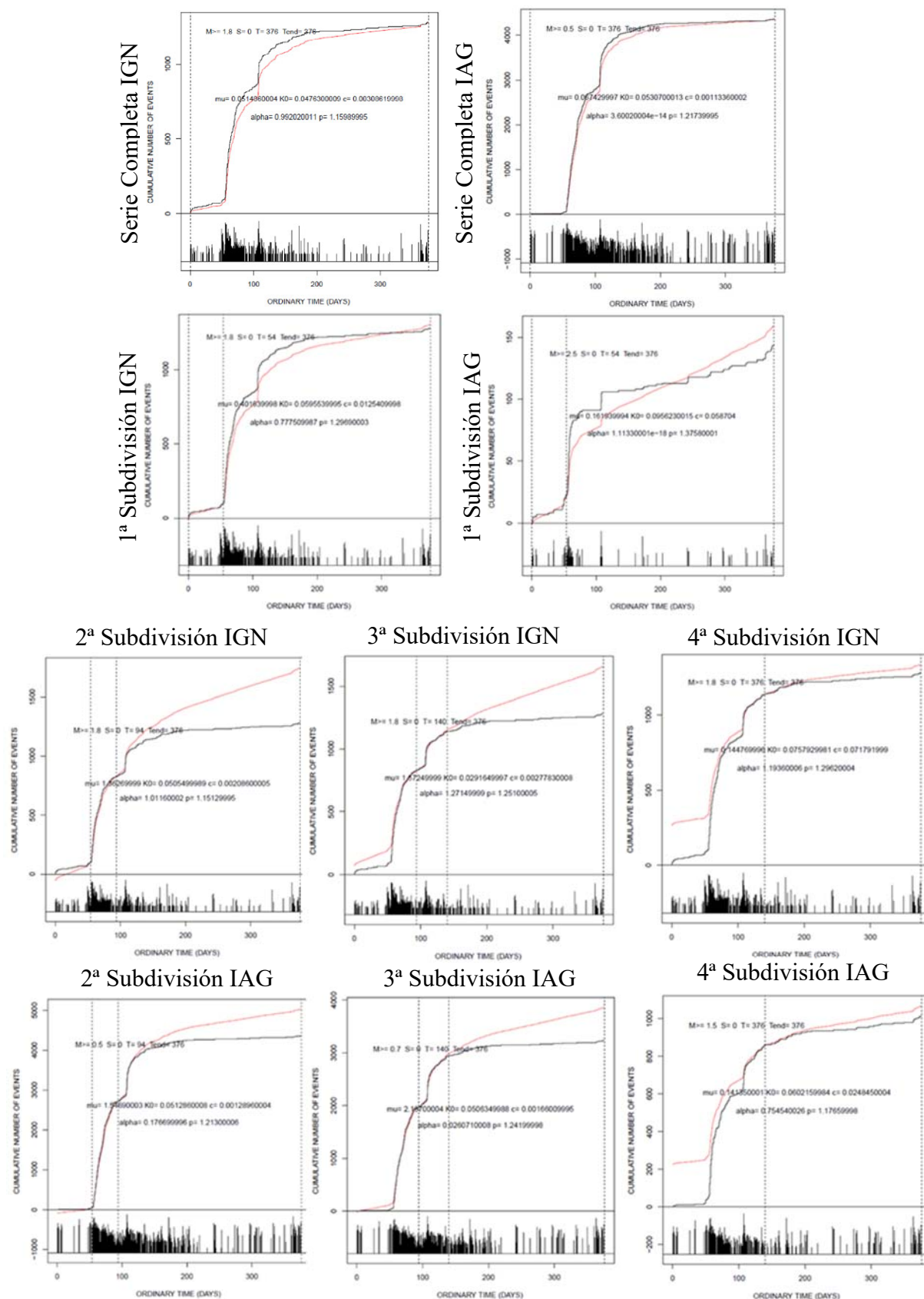


Figura 18. Soluciones gráficas de los ajustes del modelo ETAS para cada una de las subseries de la serie sísmica del IGN y del IAG de Torreperogil-Sabiote. Sin precursory. El eje de ordenadas está representado por el número acumulado de eventos, y el eje de abcisas por el tiempo (días). Gráficas con distinta escala.

6.2 ANÁLISIS DE LA SERIE SÍSMICA DE CASTOR

6.2.1 Estimación de parámetros de recurrencia (Ley de Gutenberg-Richter)

A continuación se muestran los valores de los parámetros obtenidos tras los ajustes de la Ley G-R (Tabla 5) y sus correspondientes representaciones gráficas (Figura 19).

Tabla 5. Valores de los parámetros de la relación G-R de la serie sísmica de Castor, para los dos tipos de divisiones: durante y postinyección, y las 4 etapas. Método de cálculo: BC.

Serie Sísmica	b	a	Mc
DURANTE INYECCIÓN	$2,36 \pm 0,43$	7,19	$2,3 \pm 0,1$
DESPUÉS INYECCIÓN	$1,18 \pm 0,17$	4,89	$2,2 \pm 0,2$
1ªSUBDIVISION	$2,22 \pm 0,34$	6,98	$2,3 \pm 0,1$
2ªSUBDIVISION	$1,17 \pm 0,36$	4	$2,1 \pm 0,2$
3ªSUBDIVISION	$1,23 \pm 0,17$	4,89	$2,2 \pm 0,1$
4ªSUBDIVISION	$1,93 \pm 0,00$	5,27	$2,1 \pm 0,2$

En Anexos se muestran los resultados obtenidos del resto de los métodos de cálculo usados para llevar a cabo el ajuste (Tabla 8), y sus correspondientes gráficas (Figura 25). Se puede ver cómo los valores de los parámetros son similares a los obtenidos por BC.

Como se puede observar en la Tabla 5, durante la etapa de inyección, el valor de b es de 2.36 ± 0.43 . Este dato es un valor de la pendiente de la recta alto (sabiendo que el valor a nivel global tiende a ser 1), lo que significa que se están produciendo en el emplazamiento muchos más terremotos de magnitudes pequeñas (microsismicidad) que grandes. Sin embargo, el valor del parámetro que se obtiene tras el cese de la inyección es de 1.18 ± 0.17 . Por tanto, existe una clara evidencia de la variación del parámetro b en casos de sismicidad inducida, ya que aumenta de manera significativa. Respecto a las precisiones, son menores en la fase de inyección al contar con menor número de eventos para realizar el ajuste.

Por otro lado, el parámetro a también es un buen indicador de la inyección, alcanzando valores de 7.19 en dicha fase. Es un valor alto si se compara con los obtenidos tras el cese de la inyección, inferiores a 5.0.

Las M_c son muy similares en ambas fases. Son valores altos si se comparan con la media de las magnitudes de los terremotos de la serie sísmica. Esto es debido a la falta de cobertura acimutal homogénea de las estaciones y su lejanía respecto al emplazamiento en cuestión, lo que reduce considerablemente la precisión en la definición de los eventos e impide el registro completo de la microsismicidad que se produce en el emplazamiento (ya que las ondas se pierden a tanta distancia). Esto hace que el registro de los terremotos de magnitudes pequeñas (microsismicidad) no se considere completo.

Por otro lado, se tienen los parámetros de las cuatro etapas en las que se ha dividido la serie sísmica. Se podría decir que la primera subserie corresponde a la fase de migración del fluido

inyectado, puesto que la dispersión del fluido continúa tras el cese de la inyección. El resto de subseries corresponden a la supuesta ruptura del sistema de fallas debido a la activación de las mismas por la llegada del fluido inyectado.

Por tanto, además de tener un valor general de los parámetros para la fase de postinyección, la división en tres etapas de la misma hace que se tenga un mayor grado de detalle, encaminado a un posible estudio geológico del sistema de fallas. Los valores que toma el parámetro b en estas etapas se aproximan a 1.2. Hay que exceptuar la cuarta subserie, donde la falta de registros hace que el programa calcule unos valores poco fiables. A través del ajuste por MAXV en *Excel*, se obtiene como resultado de la cuarta etapa un valor de 1.54 ± 0.41 para la b , y 4.37 para la a (ver Tabla 8 en Anexos). Estos valores de b y a se acercan más a los de la segunda y tercera subserie que los obtenidos mediante *ZMAP*.

De esta forma, la primera subserie muestra unos parámetros muy similares a los de la fase de inyección y muy distantes a los del resto de las subseries. Respecto a los parámetros b y a , toman unos valores para la primera etapa de aproximadamente 2.00 y 7.00 respectivamente, diferenciándose considerablemente del valor de los parámetros del resto de las subseries, rondando valores de 1.0 para la b e inferiores a 5.00 para la a . Finalmente, las magnitudes mínimas de completitud son de 2.1-2.3, tanto en la fase de inyección como en la de postinyección.

Según los mapas de distribución de los parámetros b y a de la Ley G-R para toda la península, realizado por el IGN (1992), el valor que toma b en la zona donde se produjo la serie sísmica, es de 0.8-0.9 aproximadamente, siendo el valor de a del orden 4.0 (ver Figura 22 de Anexos). En este estudio se ha obtenido, en la fase de inyección, un valor de b de 2.36 ± 0.43 , y de a de 7.19. Sin embargo, en la fase de postinyección, el valor de b es 1.18 ± 0.17 , siendo 4.89 el del parámetro a . De esta forma, se puede observar que la inyección alteró los valores naturales de ambos parámetros, alcanzando cifras relativamente altas. Los resultados obtenidos en la fase de postinyección se acercan más a los citados valores naturales.

Atendiendo a las soluciones gráficas obtenidas mediante *ZMAP* (Figura 19), se puede ver cómo el valor de la pendiente, en prácticamente todas las subseries, no se ajusta adecuadamente a los terremotos de magnitudes grandes, quedando subestimada la frecuencia de los mismos.

Por otro lado, en las gráficas se observa de manera muy clara el cambio significativo del valor de la pendiente de la fase de inyección a la de postinyección. También se puede ver el escaso número de datos con los que se cuenta en la primera fase para llevar a cabo el ajuste.

Finalmente, las representaciones gráficas de la primera y cuarta etapas muestran ajustes menos fiables que los de la segunda y tercera etapas, debido al escaso número de datos que poseen.

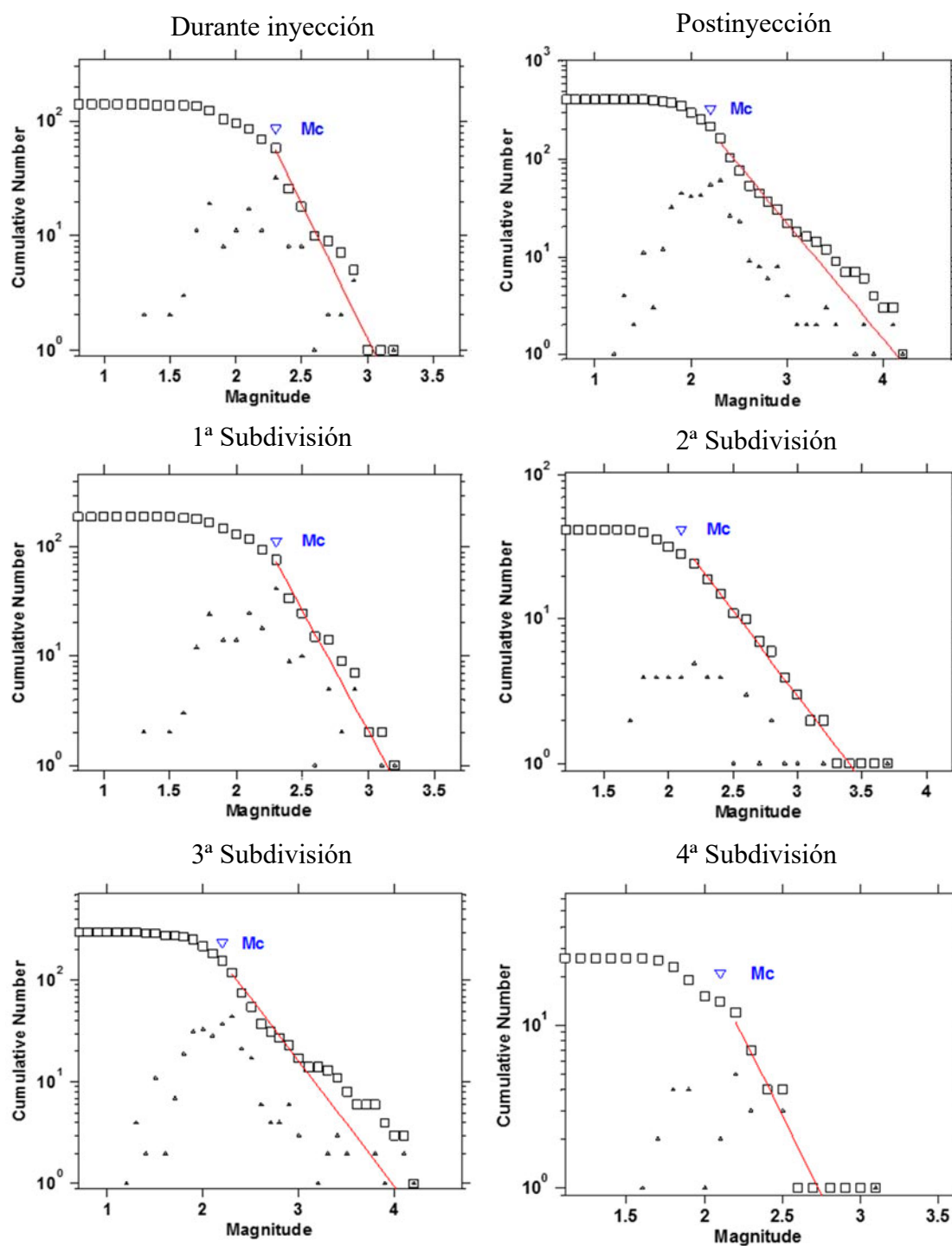


Figura 19. Gráficas de la relación G-R de la serie sísmica de Castor, para los dos tipos de divisiones: durante y postinyección, y las cuatro etapas. Método de cálculo: BC. El eje de ordenadas está representado por el logaritmo del número acumulado de eventos, y el eje de abcisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala.

6.2.2 Análisis de la variación temporal de b y M_c

En la Figura 20 se muestra el comportamiento temporal que poseen b y M_c en las distintas subseries de la serie sísmica de Castor.

En la fase de inyección, *ZMAP* grafica desde el 10 de Septiembre de 2013 hasta el 16. Se observa un comportamiento constante de b en la primera mitad de la gráfica, rondando valores de 1.5-2.0, seguido de un posterior ascenso del parámetro, superando valores de 3.0. Sin embargo, la fase de postinyección comienza con valores aproximados de 1.4-1.5, descendiendo progresivamente hasta alcanzar dos mínimos que se aprecian claramente en las gráficas. Al igual que ocurre en la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote, estos mínimos, que representan los valores más bajos del parámetro en toda la subserie, coinciden con los intervalos de mayor frecuencia diaria de sismos. Dichos valores son muy similares a los que se obtienen con *ZMAP* en el ajuste de la relación G-R. Por otro lado, el valor de M_c a lo largo de ambas fases se mantiene constante entre 2.2-2.3. En la fase de postinyección, *ZMAP* comienza a graficar desde el 24/09/2013 hasta el 07/10/2013.

Analizando temporalmente M_c en las 4 etapas, se puede observar su comportamiento estable a lo largo de las mismas, manteniéndose en valores de 2.1-2.3, coincidiendo con los resultados obtenidos en la relación G-R.

Respecto al parámetro b , los valores que alcanza en la primera subserie no tienen mucho sentido. Estos resultados pueden ser consecuencia de la falta de datos para llevar a cabo un cálculo robusto. Lo que sí se observa es un comportamiento inicial aparentemente constante, como ocurría en la fase de inyección, con valores entre 1.5 y 2.0.

La representación gráfica del valor de b en la segunda etapa no permite ningún tipo de análisis fiable, debido a los valores absolutos obtenidos tras el cálculo.

La tercera subserie es la que muestra un comportamiento de la curva más asumible y esperado, con valores generales de 1.2, y una tendencia relativamente constante. Finalmente, el programa no puede calcular la variación temporal de b en la cuarta etapa, debido posiblemente al escaso número de datos.

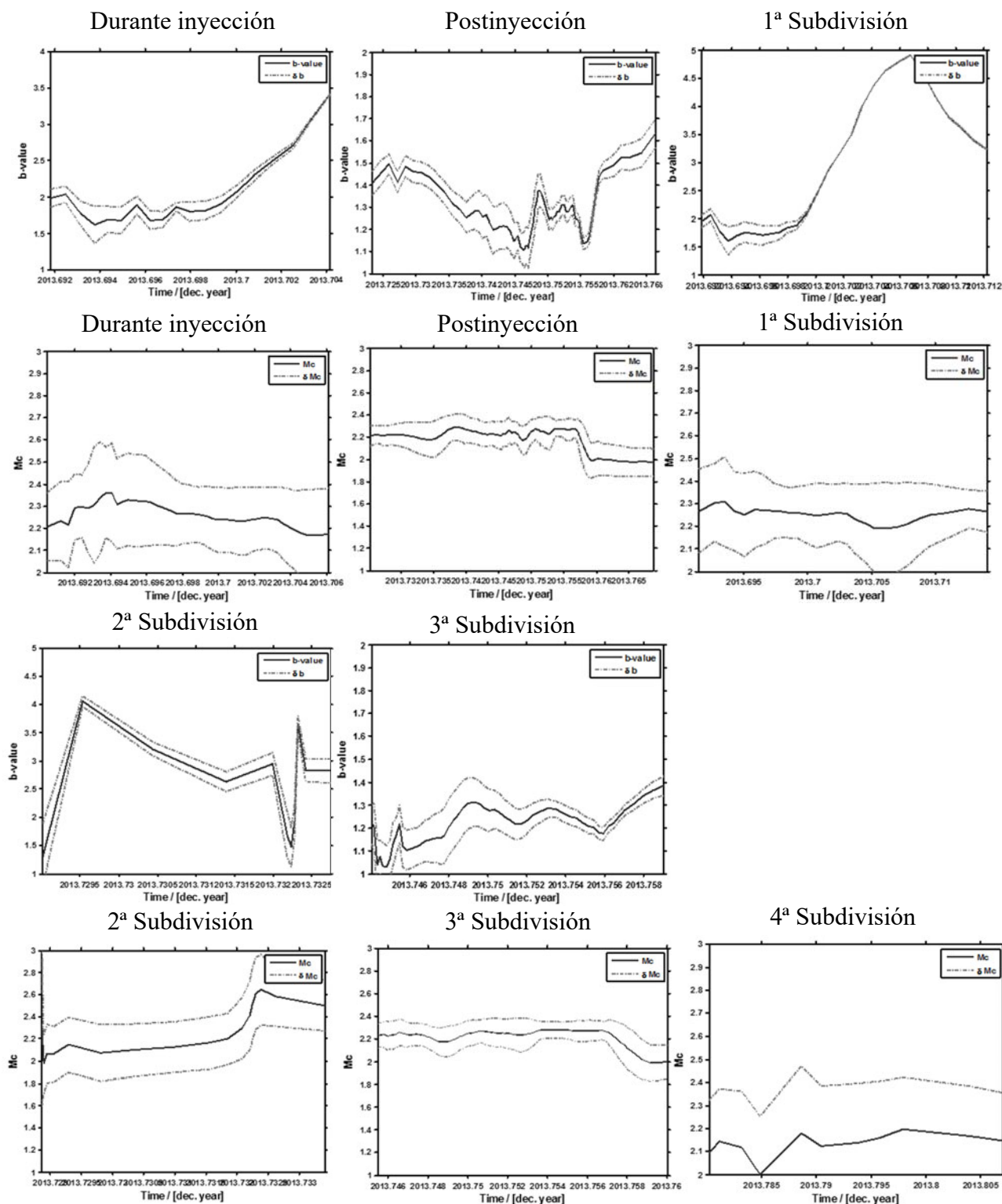


Figura 20. Variación temporal de los parámetros b y M_c en las distintas subseries de la serie sísmica de Castor. El eje de ordenadas está representado por el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el eje de abscisas por el tiempo (año decimal). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala.

6.2.3 Decaimiento de réplicas: ajustes al modelo ETAS

A continuación se muestran los valores de los parámetros obtenidos tras el ajuste del modelo ETAS en la serie sísmica de Castor (Tabla 6). En Anexos (Figura 28) se encuentran los histogramas donde se muestran los resultados de las distintas subseries sísmicas.

Tabla 6. Valores de los parámetros obtenidos del ajuste del modelo ETAS en la serie sísmica de Castor. Sin precursory.

Subdivisión	Parámetros ETAS					Mc
	μ	K	c	α	p	
DURANTE INYECCIÓN	0,44	0,16	0,01	0,80	0,90	2,3
DESPUÉS INYECCIÓN	0,49	0,03	0,03	1,46	1,64	2,2
1ª SUBDIVISIÓN	0,38	0,12	0,02	0,18	1,20	2,3
2ª SUBDIVISIÓN	1,32	0,01	0,02	1,46	1,85	2,1
3ª SUBDIVISIÓN	2,21	0,01	0,04	1,62	2,06	2,2
4ª SUBDIVISIÓN	NO CALCULA					2,1

A primera vista se ve que en la última subserie, debido a la escasez de registros, el programa no permite realizar el ajuste del modelo.

El parámetro μ presenta valores muy similares en la fase de inyección y postinyección, lo que significa que poseen el mismo nivel de background. Sin embargo, si hacemos el análisis dividiendo la serie sísmica en 4 etapas, se ve cómo en la primera el valor de μ baja, y el de la segunda y tercera subdivide considerablemente. Posiblemente, este cambio significativo en el valor del parámetro se deba, en parte, a que el supuesto bajo nivel de sismicidad de la cuarta etapa diese lugar a un valor de μ tan pequeño que bajase la media de las tres últimas etapas, obteniendo como resultado el valor de 0.49 de la fase de postinyección.

Otra posible causa de este cambio significativo de μ podría ser los 7 días que diferencian la subserie de inyección y la subserie de la primera etapa. Como se ha dicho anteriormente, el cese de la inyección no impide que el fluido ya inyectado siga migrando por el medio. La fase de inyección no tiene en cuenta, por tanto, esa sismicidad posterior al cese, considerando que pertenece a la sismicidad disparada que se produce a continuación. Al no incluir los eventos registrados esos 7 días, se está asumiendo una tasa de background mayor, ya que el cese se produjo cuando la frecuencia de sismos alcanza un máximo.

Respecto al valor de K, es mayor en la fase de inyección y en la primera subdivisión, cuyos valores distan considerablemente de los del resto de las subseries. Sin embargo, el parámetro c posee unos valores similares en toda la serie.

Atendiendo a los parámetros α y p, existe una clara diferencia entre los valores obtenidos durante la inyección y la postinyección. Como sucede con el parámetro b de la ley G-R, α y p podrían ayudar a caracterizar series inducidas. Como ya se dijo en el marco teórico, una actividad tipo enjambre, que en este caso correspondería a la fase de inyección, tiene un α más pequeña que aquella que posea un terremoto principal y sus réplicas, correspondiente en este caso a la fase de postinyección (debido a la sismicidad disparada). Al analizar dicho parámetro en las 4 etapas, se puede ver cómo la diferencia de los valores aumenta. Por otro lado, el valor de p indica que la velocidad de decrecimiento de las réplicas es mayor en la fase de

postinyección. Esta velocidad de decrecimiento puede verse en la Figura 11, donde se aprecia cómo en la primera subserie los eventos decaen progresivamente, mientras que en la segunda y tercera subserie, lo hacen de manera brusca.

La solución gráfica correspondiente a los parámetros obtenidos se muestra en la Figura 21. Ajustar el modelo a los datos de la fase de inyección, hace que la extrapolación de la tasa calculada (línea roja), se diferencie en gran medida a la real (línea negra). Lógicamente, la extrapolación del modelo muestra la tendencia de la tasa de terremotos en el supuesto de no haberse parado la inyección, ya que sólo se está calculando con datos de dicha fase. Al igual que los datos reproducen un buen modelo ETAS en la fase de inyección, no ocurre lo mismo en la fase de postinyección, donde el modelo subestima la tasa real constantemente, salvo en la fase de inyección.

Analizando las gráficas de cada una de las etapas (sólo las tres primeras ya que la cuarta no calcula por falta de datos), se ve cómo los datos reproducen un peor modelo ETAS, comparado con la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote. Esto puede ser debido a que se cuenta con muchos menos datos (552 eventos) para toda la serie, frente a los 2221 del IGN o los 7020 del IAG. Por ello en las gráficas se observan pequeños escalones, o dicho de otro modo, poca suavidad.

La extrapolación del ajuste de la primera subserie muestra una tasa mucho más cercana a la real que la de la fase de inyección, al tener en cuenta los eventos registrados 7 días más tarde al cese de la inyección. Por otro lado, en la segunda y tercera etapa, los ajustes son más precisos si los comparamos con el ajuste de la fase de postinyección. Aun así, en todas las gráficas, salvo en la de la etapa de inyección, el valor de la tasa calculada queda siempre por debajo de la real.

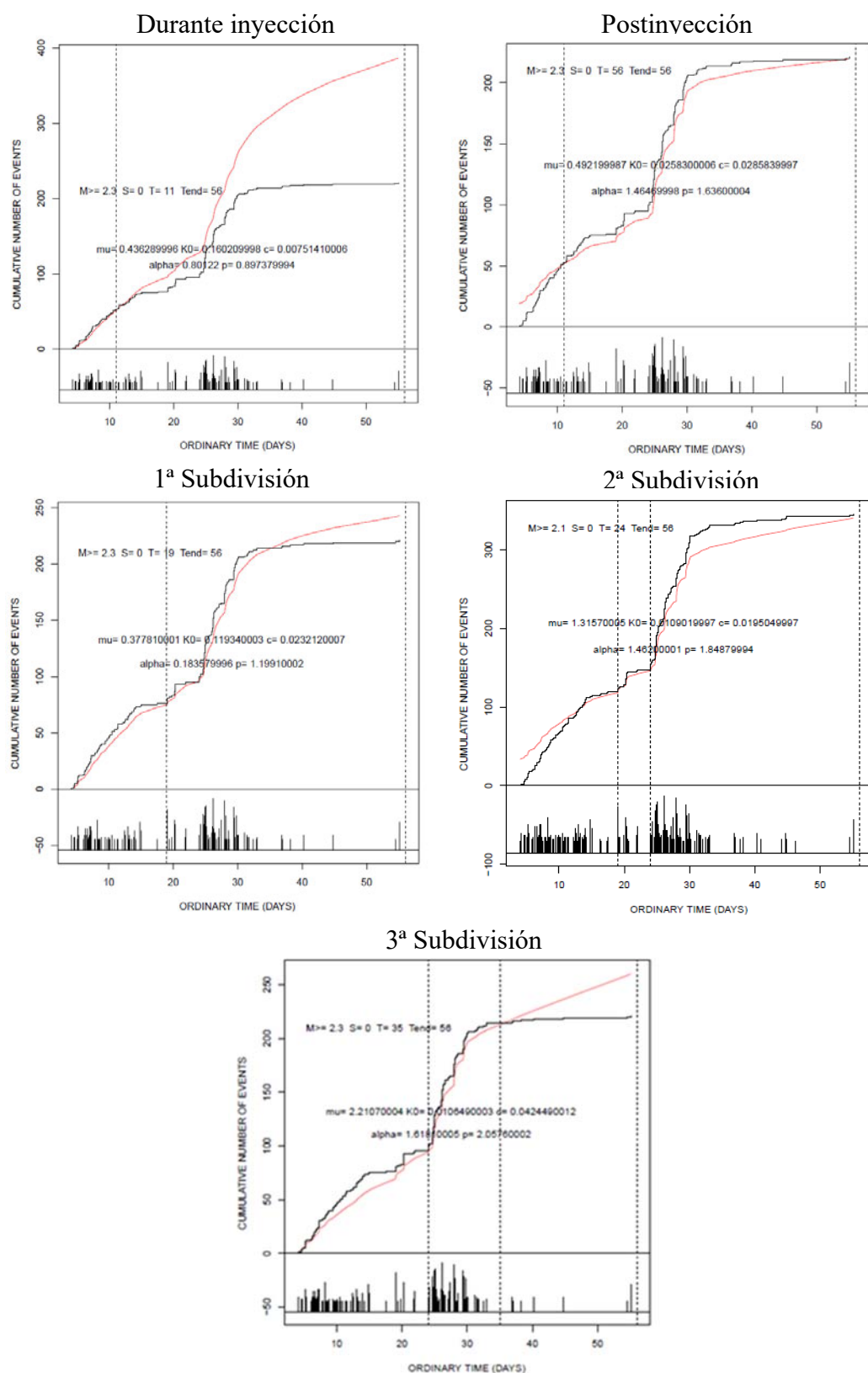


Figura 21. Soluciones gráficas de los ajustes del modelo ETAS para cada una de las subseries de la serie sísmica de Castor. Sin precursor. El eje de ordenadas está representado por el número acumulado de eventos, y el eje de abscisas por el tiempo (días). Gráficas con distinta escala.

7 SUMARIO DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Este apartado resume los principales resultados y las conclusiones extraídas tras el análisis y discusión de los valores de los parámetros sísmicos obtenidos en las series de Torreperogil-Sabiote y Castor.

Los resultados del ajuste del modelo G-R y del análisis temporal de b y M_c en la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote concluyen que:

- El hecho de tener un catálogo con más eventos (IAG), no implica que los datos se ajusten mejor al modelo. Se ha visto que la serie sísmica del IGN ajusta mejor al modelo G-R que la serie del IAG. Sin embargo, la ventaja de tener más registros hace que el cálculo sea más robusto y los resultados más precisos (desviaciones menores).
- La división en 4 etapas permite ver que el valor de b en la primera subserie queda por encima del valor medio del resto de subseries, debido al mayor número de eventos de baja magnitud registrados en esa primera etapa. Por otro lado, en la serie sísmica del IAG, se obtiene un valor de M_c muy alto, debido a la falta de datos para estimar la completitud de la subserie. Esto afecta al valor de la pendiente de la recta G-R, al basarse sólo en los terremotos de magnitudes mayores para llevar a cabo el ajuste.
- En aquellos intervalos de mayor frecuencia diaria de eventos las precisiones mejoran significativamente, debido a la abundancia de datos.
- Los valores de b y M_c disminuyen en los intervalos de mayor frecuencia diaria de sismos. El parámetro b disminuye debido a que las magnitudes más altas registradas en toda la serie coinciden con dichos intervalos. Por otro lado, el parámetro M_c disminuye ya que la abundancia de datos hace que se puedan establecer magnitudes de corte bajas a partir de las cuales el catálogo se considera completo.
- Los valores de b y M_c obtenidos del ajuste del modelo G-R para cada subserie sísmica coinciden con los valores que adquieren dichos parámetros en los intervalos de mayor frecuencia de terremotos en cada una de ellas.
- La elección de un tamaño óptimo y homogéneo de la ventana temporal para el cálculo de la variación de b y M_c en el tiempo, en la serie sísmica completa, es una tarea difícil y tediosa, pero fundamental. Los tramos de gran concentración de sismos requieren ventanas temporales grandes que sinteticen lo mejor posible la información, lo que hace que sea escaso para el cálculo el número de eventos en los tramos de poca frecuencia. El estudio temporal por etapas (establecidas en función de la frecuencia diaria de sismos), hace que dicha elección del tamaño de la ventana sea más sencillo y se adapte mejor a las características de cada tramo de la serie.

- Mediante el análisis temporal de b y M_c por etapas, se observa en las representaciones gráficas cómo la escasez de datos en la primera y cuarta subserie hace que se obtengan incertidumbres altas y poca fiabilidad en el cálculo (lo que no ocurre en la segunda y tercera etapas, al haber más abundancia de datos). Sin embargo, la M_c en la serie sísmica del IGN presenta un comportamiento constante a lo largo de todas las etapas, corroborando el valor obtenido tras el ajuste del modelo G-R. Por otro lado, se percibe con mayor detalle la variación temporal de M_c en función de la frecuencia en las subseries sísmicas del IAG.

Respecto al modelo ETAS, en la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote se concluye lo siguiente:

- El parámetro μ confirma que el emplazamiento donde se produjo la serie sísmica se caracteriza por su baja actividad sísmica, ya que el valor del background obtenido en ambos catálogos es bajo. Al analizar dicho parámetro en las cuatro etapas en las que se ha dividido la serie, se observa que toma valores mayores en la segunda y tercera etapas, resultado lógico sabiendo que en esas subseries se registraron la mayoría de los terremotos de la serie.
- Los valores que toma el parámetro K para la serie completa y cada una de sus subseries son similares, por lo que la productividad de un terremoto de magnitud M_c es similar en todas las etapas (esta comparación es posible en la serie sísmica del IGN, donde el valor de M_c es constante en todas las subseries).
- El parámetro c muestra valores más altos en la primera y cuarta etapas que en la segunda y tercera. Al afectar de manera inversa a la tasa de réplicas (elevado a p , que se mantiene prácticamente constante a lo largo de toda la serie sísmica), en la primera y cuarta subseries dicha tasa es menor que en la segunda y tercera.
- Respecto al parámetro α , toma valores similares en la serie sísmica completa y las distintas subseries, siendo bajos al tratarse de un enjambre sísmico.
- Al contrario que ocurre con el ajuste del modelo G-R, la serie sísmica del IAG muestra un mejor ajuste al modelo ETAS que la serie sísmica del IGN (posiblemente por la gran cantidad de datos que posee).
- Las series completas reproducen, de manera general, un mejor modelo ETAS que haciendo los ajustes por etapas. Al llevar a cabo los ajustes del modelo en las distintas subseries, se observa que la tasa calculada coincide prácticamente con la real en la subserie en cuestión, en cambio, la extrapolación de dicha tasa muestra grandes diferencias con la real en la mayoría de las etapas restantes.

La ventaja de contar con dos catálogos de una misma serie sísmica ha sido ver las diferencias y similitudes que poseen, tanto en la distribución espacio-temporal de la serie, como en el valor de los parámetros obtenidos. Si la serie sísmica del IGN tuviera más cantidad de datos se conseguirían mejores ajustes del modelo ETAS y tener mayor redundancia y robustez en los cálculos. Por otro lado, la serie sísmica del IAG precisa del estudio de una nueva M_c que haga

que el ajuste del modelo G-R sea óptimo. La división por etapas de ambos catálogos ha permitido ver que no se obtienen valores de los parámetros muy dispares entre sí, ya que la serie constituye un enjambre sísmico, donde es difícil establecer una división óptima. Sin embargo, dicha división ha facilitado la interpretación y el análisis temporal de los parámetros b y M_c .

Respecto a la serie sísmica de Castor, se puede decir que:

- Los parámetros b y a de la Ley G-R son buenos indicadores de la inyección llevada a cabo en los meses de Septiembre y Octubre de 2013. Por tanto, son parámetros que ayudan a discriminar entre la sismicidad inducida y la disparada, tomando valores de b cercanos a 2.0 y a 1.0 respectivamente.
- Las precisiones son menores en la fase de inyección, al contar con menor número de eventos para realizar el ajuste, que en la fase de postinyección.
- Los datos públicos descargados de la página web oficial del IGN son escasos y poco precisos, debido a falta de cobertura acimutal homogénea de la red, la escasez de estaciones sísmicas y la lejanía de las mismas al emplazamiento en cuestión (ya que se encuentra en el Mar Mediterráneo). Esto hace que:
 - Se impida el adecuado registro de la microsismicidad debida a la inyección, lo que hace que se obtengan valores de M_c altos (si se comparan con la media de las magnitudes de los terremotos registrados), no considerándose completo el catálogo para las magnitudes pequeñas (que son fundamentales en este estudio).
 - El análisis espacial de la serie sísmica pierda fiabilidad, ya que los errores en localización son considerables.
- La escasez de registros del catálogo hace que los datos no ajusten adecuadamente al modelo G-R, sobre todo en la fase de inyección y en las 4 subseries, donde la extrapolación de la recta G-R subestima el número de terremotos de magnitudes grandes.
- A su vez, dicha escasez de datos hace complicado el análisis temporal de los parámetros b y M_c . La mayoría de las representaciones gráficas del parámetro b (pudiendo exceptuar la fase de postinyección y la tercera subserie), no muestran valores, precisiones ni tendencias coherentes ni fiables. En cambio, el valor de M_c se ve constante a lo largo de toda la serie.
- El estudio de los parámetros del modelo G-R en las 4 etapas de la serie sísmica (divididas en función de la frecuencia diaria de sismos), muestra unos resultados muy similares a los obtenidos dividiendo la misma en dos fases: durante y postinyección. En cambio al realizar el ajuste del modelo ETAS con dichas subseries, sí se obtiene más información que la que dan las dos fases:

- Mientras que el parámetro μ es similar en la fase de inyección y postinyección, el valor obtenido en la primera subserie se diferencia significativamente de la segunda y tercera. Esto podría ser debido, en parte, a que el valor de la cuarta etapa fuera tan pequeño que compensara los de la segunda y tercera, obteniendo valores finales similares a los de la fase de inyección; y en parte, a que al tener en cuenta en la primera etapa la migración del fluido por el medio haga que la tasa de sismicidad de fondo disminuya, incrementando la diferencia con las etapas posteriores.
- Mientras que el parámetro c toma unos valores similares para todas las fases y etapas, K , α y p se diferencian claramente en la fase inducida y en la disparada. Esta diferencia se corrobora observando los valores de las distintas subseries. Este hecho podría indicar nuevos parámetros que permitan discriminar entre sismicidad inducida y disparada. El valor de α es menor en la fase de inyección, ya que se acerca más a un enjambre sísmico, que en la de postinyección. Además es coherente que la tasa de decaimiento de la réplicas, representada por p , sea menor en la fase de inyección y mayor en la de postinyección, si observamos los histogramas de frecuencia diaria de eventos.
- La representación gráfica de los ajustes del modelo ETAS permite analizar cómo podría haber continuado la actividad sísmica en el supuesto de que no se hubiera parado la inyección. Por otro lado, ajustando los datos a la primera etapa, se obtienen unos resultados de los parámetros para toda la serie asumibles teniendo en cuenta la escasez de datos.

Por tanto, en la serie sísmica de Castor, al tratarse de un presunto caso de sismicidad inducida y posterior sismicidad disparada, tiene más sentido hacer un estudio por etapas o fases en el que analizar detalladamente las variaciones temporales de los parámetros sísmicos. Sin embargo, en la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote, al tratarse de un enjambre sísmico, es más difícil detectar variación de dichos parámetros, por lo que es más lógico hacer un estudio general de la serie sísmica.

Como conclusión global del estudio, se ha alcanzado una cierta sensibilidad sobre el comportamiento de parámetros característicos de una serie sísmica, y sobre su variación temporal; así como sobre la idoneidad de dos modelos para representar la recurrencia y el patrón de sismicidad de dos series concretas, una claramente producida por actividad antrópica (Castor) y otra, en principio, natural (Torreperogil-Sabiote). Se ha comprobado, además, la variación del parámetro b del modelo G-R y de los parámetros K , α y p del modelo ETAS, como hechos discriminatorios entre sismicidad inducida y disparada, en el caso de la serie Castor. El análisis de la variación temporal de parámetros dividiendo la serie completa en subseries cobra mayor sentido en el caso de la serie de Castor que en la de Torreperogil-Sabiote, debido probablemente a que esta última es un enjambre sísmico asociado a una actividad natural en la que, al no existir un factor externo, como en el caso de una inyección de gas, lleva asociado un patrón de sismicidad más homogéneo.

8 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación se presentan algunas ideas interesantes en las que se podría profundizar en futuros trabajos de investigación y que podrían contribuir y complementar el estudio de este PFG:

- Realizar el análisis espacial de ambas series sísmicas, que complementase el análisis temporal. De esa forma, se podría estudiar la distribución de los eventos y relacionarlos con los sistemas de fallas y estructuras del subsuelo. Para ello, sería interesante contar con una base de datos relocalizada (con pocos errores en localización).
- Analizar las variaciones de los parámetros b y M_c en el tiempo mediante ventanas temporales deslizantes con recubrimiento, cuyo tamaño venga definido por una unidad de tiempo (días, meses, etc.), de manera que se pueda estimar el comportamiento de los parámetros en los días, meses, etc. inmediatamente posteriores, en base a los valores de los mismos obtenidos en los días, meses, etc. inmediatamente anteriores.
- Estudiar el parámetro M_c de la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote (del catálogo del IAG), estableciendo un valor más adecuado, para obtener un mejor ajuste del modelo G-R, y común para toda la serie, de manera que facilite el análisis de los parámetros del modelo ETAS, entre otros.
- Analizar un catálogo de la serie sísmica de Castor con mayor número de eventos y de mejor calidad, de manera que se puedan estudiar adecuadamente sus parámetros y obtener M_c más bajas.
- Estudiar otras series caracterizadas por una sismicidad inducida y posterior sismicidad disparada, observando el valor que se obtiene de los parámetros K, p y α del modelo ETAS, y su posible similitud con los obtenidos en este estudio.
- Proponer una mejora de la cobertura de la red fija de estaciones sísmicas, sobre todo en zonas costeras, que es donde más difícil es el registro.
- Llevar a cabo un análisis similar mediante otro criterio de división de las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote y Castor, en base a los resultados de este estudio, hasta encontrar la división óptima de ambas series (si la hay).



REFERENCIAS

Aki, 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its condence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 43, 237-239.

Avith, 2012. Estudio de la estabilidad del valor de b para regiones sismotectónicas de México. Tesis Profesional. Universidad Nacional Autónoma de México.

Bender, 1983. Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 73*, p. 831-851.

Cabañas et al., 2014. Relationships between M_w and other size parameters from the IGN seismic catalog. *Pure Applied Geophysics DOI/ISSN: 10.1007/s00024-014-1025-2*.

Cesca et al., 2014. The 2013 September-October seismic sequence offshore Spain: a case of seismicity triggered by gas injection? *Geophys. J. Int.* 198, 941-953.

Eagar et al., 2006. Evidence of possible induced seismicity in the Wabas Valley seismic zone from improved microearthquake locations. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, 1718–1728.

Escal UGS, 2012. III Congreso abierto y virtual 2020. Mesa redonda: Energía e infraestructuras. Universitat Jaume I- Periódico mediterráneo. Castellón. Almacenamiento Subterráneo de Gas Natural. Proyecto Castor.

Frohlich y Davis, 1993. Teleseismic b values: or much ado about 1.0. *J. Geophys. Res.*, 98, 631-644.

Gardner y Knopoff, 1974. Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, 1363-1367.

Gupta, 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews* 58, 279–310.

Gutenberg y Richter, 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 34, 185-188.

Gutenberg y Richter, 1954. Seismicity of the Earth (and associated phenomena). Princeton University Press, Princeton, NJ, EUA.

Hanks y Kanamori (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research* 84, pp. 23480-23500.

IGME, 2013. Informe geológico sobre la crisis sísmica relacionada con el almacén subterráneo de gas denominado Castor (Castellón, noreste de España).



IGN-UPM (2013). Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012. *Editorial Centro Nacional de Información Geográfica*, Madrid. ISBN: 978-84-416-2685-0.

Ishimoto e Ida, 1939. Observations of earthquakes registered with the microseismograph constructed recently. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 17, 443-478.

Kossobokov y Keilis-Borok, 2000. Implications of a Statistical Physics Approach for Earthquake Hazard Assessment and Forecasting. *Pure Appl. Geo-phys.*, 157, 11, 2323-2349.

Ledesma, 2008. Introducción al Bootstrap. Desarrollo de un ejemplo acompañado de software de aplicación. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology 2008*, Vol. 4 (2), p. 51 - 60.

López, 2011. Análisis de regresión lineal para correlacionar datos del valor b en catálogos de sismicidad obtenidos mediante dos técnicas. Tesis Profesional. Universidad Autónoma de Nuevo León.

López, 2008. Nuevas fórmulas de magnitud para la Península Ibérica y su entorno. Trabajo de investigación del Máster en Geofísica y Meteorología. Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.

Mekkawi et al., 2004. Grasso, J. R. & Schnegg, P. A. A long-lasting relaxation of seismicity at Aswan reservoir, Egypt, 1982-2001. *Bull. Seism. Soc. Am.* 94, 479-492.

Molina y Ruiz, 2002. Cambios temporales del valor de b : ¿Posibles correlaciones con la actividad hidrotermal del volcán Tungurahua?. Universidad Nacional de Colombia.

NCSE, 2002. Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación. BOE 244, 35898-35967.

Ogata, 1987. Long term dependence of earthquake occurrences and statistical models for standard seismic activity (in Japanese), *Suri Zisin Gaku (Mathematical Seismology) II* (ed. M. Saito), *ISM Cooperative Research Report 3*, 115-124, *Inst. Statist. Math.*, Tokyo.

Ogata, 1988. Statistical Models for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Processes. *Journal of the American Statistical Association*, 83(401), 9-27.

Ogata, 1989. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis, *Tectonophysics*, 169, 159-174.

Ogata, 1992. Detection of precursory seismic quiescence before major earthquakes through a statistical model, *Journal of geophysical Research*, 97, 19845-19871.

Ogata, 1998. Space-time point-process models for earthquake occurrences. *Ann. Inst. Statist. Math.* Vol. 50, No. 2, 379-402.

Peláez y López Casado, 2002: Seismic hazard estimate at the Iberian Peninsula. *Pure and Applied Geophysics*, 159: 2699-2713.



Peláez *et al.*, 2013. La serie sísmica de Torreperogil-Sabiote (Jaén). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2013.

Reasenbergs, 1985. Second Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982. *J. Geophys. Res.*, 90, 5479-5495.

Redmayne, 1998. Mining induced seismicity in UK coalfields identified on the BGS National Seismograph Network. Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publications* 5, 405–413.

Sanz de Galdeano y Peláez, 2011. Fallas activas en la Cordillera Bética. Una aproximación a partir de la información tectónica y sísmica. *Editorial Universidad de Granada*.

Simpson *et al.*, 1988. Two types of reservoir-induced seismicity. *Bull. Seism. Soc. Am.* 78, No. 6, 2025–2040.

Utsu, 1957. Magnitude of earthquake and occurrence of their aftershocks. *J Seismological Soc. Jap.* 10. 34-15.

Utsu, 1961. A Statistical study on the occurrence of aftershocks. *Geophysics Mag.*, 30.521 – 605.

Utsu y Ogata, 1997. Computer program package: Statistical Analysis of point processes for Seismicity, SASEIS, IASPEI Software Library for personal computers, the International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior in collaboration with the American Seismological Society, Vol. 6, pp. 13-94.

Utsu *et al.*, 1995. The Centenary of the Omori Formula for Decay law of Aftershock Activity. *Journal Physics of the Earth*, 43, 1, p. 1-33.

Wiemer y Wyss, 2000. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 4, 859-869.

Woessner y Wiemer, 2005. Assessing the Quality of Earthquake Catalogue: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty, *Bull. Seis- mol. Soc. Am.*, 95, 2, 684-698.

Yazdi y Quirós. Challenges for the estimation of expected damage during a seismic sequence. Application to the municipality of Torreperogil, Jaen. *En prensa*.



ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. **Relación G-R.** Los datos de la gráfica izquierda (con una M_c de 1.7), se ajustan adecuadamente a la resta. Sin embargo, los de la derecha (con una M_c de 0.4), no reproducen un buen modelo de G-R. Gráficas con distinta escala..... 20
- Figura 2. **Resultado de M_c por el método MAXC.** Se indica con un diamante en la distribución acumulada (cuadrados), que corresponde con el pico de la distribución no acumulativa (triángulos). La línea gris representa la relación G-R correspondiente a esta distribución. Fuente: Woessner y Wiemer (2005). 21
- Figura 3. Representación gráfica del número de eventos registrados desde la ocurrencia del sismo principal, durante el tiempo t (**Ley modificada de Omori-Utsu**). 22
- Figura 4. **Localización geográfica de las poblaciones de Torreperogil y Sabiote.** 25
- Figura 5. **Valores de aceleración para toda España.** Fuente: IGN-UPM..... 25
- Figura 6. **Nivel de actividad sísmica registrada en Torreperogil-Sabiote en los últimos 15 años, y durante los meses del 2012 y 2013.** Datos sísmicos procedentes del catálogo del IGN para un recuadro de latitudes 37.9551°N/38.0982°N y longitudes 3.3875°W/3.1562°W..... 26
- Figura 7. **Localización geográfica de la plataforma marina Castor.** 26
- Figura 8. **Esquema general de las instalaciones del Proyecto Castor.** Fuente: Escal UGS. 26
- Figura 9. **Nivel de actividad sísmica registrada en torno a la plataforma Castor durante los últimos 15 años, y durante los meses de 2013.** Datos sísmicos procedentes del catálogo del IGN para un recuadro de latitudes 40.30°N/40.48°N y longitudes 0.60°E/0.84°E. Gráficas con distinta escala. 27
- Figura 10. **Histogramas de frecuencia diaria de terremotos (barras azules) y magnitudes máximas (cuadrados rojos) y mínimas (triángulos verdes) observadas desde el 21 de Octubre de 2012 hasta el 31 de Octubre de 2013, de las series sísmicas del IGN y del IAG.** Se muestran, además, los límites de las etapas elegidas para realizar el estudio (líneas verticales negras). Gráficas con distinta escala..... 34
- Figura 11. **Histogramas de frecuencia diaria de terremotos (barras azules) y magnitudes máximas (cuadrados rojos) y mínimas (triángulos verdes) observadas desde el 5 de Septiembre hasta el 30 de Octubre de 2013.** Se muestran, además, las subseries en las que se ha dividido la serie sísmica: durante y postinyección (gráfica superior), y en 4 etapas (gráfica inferior). Datos sísmicos procedentes del catálogo del IGN para un recuadro de latitudes 40.30°N/40.48°N y longitudes 0.60°E/0.84°E..... 39
- Figura 12. **Relación G-R de las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN y del IAG), para la serie completa y sus subseries.** Método de cálculo: BC. El eje de ordenadas está representado



por el logaritmo del número acumulado de eventos, y el eje de abcisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala..... 49

Figura 13. **Variación temporal de los parámetros b y M_c en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG).** Las líneas rojas muestran los límites de las cuatro subseries. Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abcisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala. 53

Figura 14. **Variación temporal de b y M_c en la 1ª etapa en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG).** Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abcisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala. 54

Figura 15. **Variación temporal de b y M_c en la 2ª etapa en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG).** Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abcisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala. 55

Figura 16. **Variación temporal de b y M_c en la 3ª etapa en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG).** Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abcisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala. 56

Figura 17. **Variación temporal de b y M_c en la 4ª etapa en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG).** Las barras azules representan el número de eventos diario. En el eje de ordenadas se encuentran: el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el número de eventos registrados por día. En el eje de abcisas se encuentra representado el tiempo (en días). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala. 57

Figura 18. **Soluciones gráficas de los ajustes del modelo ETAS** para cada una de las subseries de la serie sísmica del IGN y del IAG de Torreperogil-Sabiote. Sin precursory. El eje de ordenadas está representado por el número acumulado de eventos, y el eje de abcisas por el tiempo (días). Gráficas con distinta escala. 60

Figura 19. **Gráficas de la relación G-R de la serie sísmica de Castor**, para los dos tipos de divisiones: durante y postinyección, y las cuatro etapas. Método de cálculo: BC. El eje de ordenadas está representado por el logaritmo del número acumulado de eventos, y el eje de abcisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala. 63



Figura 20. **Variación temporal de los parámetros b y M_c en las distintas subseries de la serie sísmica de Castor.** El eje de ordenadas está representado por el valor que adquieren los parámetros conforme avanza el tiempo (línea negra), y el eje de abscisas por el tiempo (año decimal). Las líneas grises son las desviaciones obtenidas. Gráficas con distinta escala. 65

Figura 21. **Soluciones gráficas de los ajustes del modelo ETAS** para cada una de las subseries de la serie sísmica de Castor. Sin precursory. El eje de ordenadas está representado por el número acumulado de eventos, y el eje de abscisas por el tiempo (días). Gráficas con distinta escala. 68

Figura 22. **Mapas de distribución de los parámetros b y a de la Ley G-R.** Fuente: IGN (1992). 84

Figura 23. **Comparación gráfica de los ajustes de la ley G-R para los diferentes métodos de cálculo**, en la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG), para la serie completa y la 1ª etapa. El eje de ordenadas está representado por el logaritmo (decimal para MAXC y MMCC y neperiano para MAXV) del número acumulado de eventos, y el de abscisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala. 85

Figura 24. **Comparación gráfica de los ajustes de la ley G-R para los diferentes métodos de cálculo**, en las subseries sísmicas (2ª, 3ª y 4ª etapa) de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). El eje de ordenadas está representado por el logaritmo (decimal para MAXC y neperiano para MAXV) del número acumulado de eventos, y el de abscisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala. 86

Figura 25. **Comparación gráfica de los ajustes de la ley G-R para los diferentes métodos de cálculo**, de la serie sísmica de Castor, en los dos tipos de divisiones: durante y postinyección, y las 4 etapas. El eje de ordenadas está representado por el logaritmo (decimal para MAXC y MMCC y neperiano para MAXV) del número acumulado de eventos, y el de abscisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala. 87

Figura 26. **Localización geográfica de las estaciones sísmicas del IGN y la Plataforma Castor.** La gama de colores de las estaciones sísmicas indica la distancia respecto a la plataforma marina. En el mapa aparecen indicados los nombres de las estaciones. Datos geográficos de las estaciones procedentes de la página web del IGN. 88

Figura 27. **Histogramas de valores de los parámetros obtenidos tras el ajuste (MAXV) del modelo ETAS** en las series sísmicas del IGN y del IAG de Torreperogil-Sabiote. Cálculos sin precursory. 89

Figura 28. **Histogramas de valores de los parámetros obtenidos tras el ajuste (MAXV) del modelo ETAS** en las distintas subseries de la serie sísmica de Castor. Cálculos sin precursory.. 90



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Esquema de las características generales de la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote (catálogos del IGN e IAG), y sus etapas.....	33
Tabla 2. Esquema de las características generales de la serie sísmica de Castor y sus etapas.	39
Tabla 3. Valores de los parámetros de la relación G-R en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG), para la serie completa y sus subseries. Método de cálculo: BC.....	47
Tabla 4. Valores de los parámetros obtenidos tras los ajustes del modelo ETAS en las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). Sin precursory.	58
Tabla 5. Valores de los parámetros de la relación G-R de la serie sísmica de Castor, para los dos tipos de divisiones: durante y postinyección, y las 4 etapas. Método de cálculo: BC. 61	
Tabla 6. Valores de los parámetros obtenidos del ajuste del modelo ETAS en la serie sísmica de Castor. Sin precursory.	66
Tabla 7. Comparación de los parámetros de la ley G-R obtenidos para los diferentes métodos de cálculo, de las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG), en la serie completa y sus divisiones.	83
Tabla 8. Comparación de los parámetros de la ley G-R obtenidos para los diferentes métodos de cálculo, de la serie sísmica de Castor, en los dos tipos de divisiones: durante y postinyección, y las cuatro subseries.....	83

ANEXOS

Tabla 7. Comparación de los parámetros de la ley G-R obtenidos para los diferentes métodos de cálculo, de las series sísmicas de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG), en la serie completa y sus divisiones.

Serie Sísmica	Método de Cálculo	IGN				IAG			
		M_c input	b	a	M_c output	M_c input	b	a	M_c output
COMPLETA	MAXC(Zmap)	-	$1,33 \pm 0,04$	5,51	$1,8 \pm 0,0$	-	$0,55 \pm 0,00$	3,84	$0,1 \pm 0,0$
	MAXV(Excel)	1,7	$1,20 \pm 0,03$	5,23	-	0,4	$0,56 \pm 0,01$	3,87	-
	MMCC(Excel)		$1,30 \pm 0,03$	5,47	-		$0,99 \pm 0,04$	4,39	-
1ª SUBDIVISION	MAXC(Zmap)	-	$1,75 \pm 0,22$	5,14	$1,8 \pm 0,0$	-	$1,57 \pm 0,50$	5,26	$2,4 \pm 0,2$
	MAXV(Excel)	1,8	$1,75 \pm 0,18$	5,14	-	2,4	$1,31 \pm 0,23$	4,55	-
2ª SUBDIVISION	MAXC(Zmap)	-	$1,34 \pm 0,06$	5,27	$1,8 \pm 0,0$	-	$0,59 \pm 0,02$	3,64	$0,1 \pm 0,1$
	MAXV(Excel)	1,8	$1,35 \pm 0,05$	5,29	-	0,4	$0,62 \pm 0,01$	3,68	-
3ª SUBDIVISION	MAXC(Zmap)	-	$1,22 \pm 0,07$	4,70	$1,8 \pm 0,0$	-	$0,60 \pm 0,01$	3,35	$0,1 \pm 0,0$
	MAXV(Excel)	1,8	$1,23 \pm 0,07$	4,71	-	0,7	$0,77 \pm 0,03$	3,53	-
4ª SUBDIVISION	MAXC(Zmap)	-	$1,35 \pm 0,13$	4,58	$1,8 \pm 0,0$	-	$0,69 \pm 0,11$	3,19	$1,3 \pm 0,3$
	MAXV(Excel)	1,8	$1,33 \pm 0,11$	4,55	-	1,5	$0,72 \pm 0,06$	3,26	-

Tabla 8. Comparación de los parámetros de la ley G-R obtenidos para los diferentes métodos de cálculo, de la serie sísmica de Castor, en los dos tipos de divisiones: durante y postinyección, y las cuatro subseries.

Serie sísmica	Método de Cálculo	M_c input	b	a	M_c output
DURANTE INYECCIÓN	MAXC (Zmap)	-	$2,37 \pm 0,43$	7,21	$2,3 \pm 0,1$
	MAXV (Excel)	2,3	$2,41 \pm 0,32$	7,31	-
DESPUÉS INYECCIÓN	MAXC (Zmap)	-	$1,31 \pm 0,13$	5,23	$2,3 \pm 0,1$
	MAXV (Excel)	2,2	$1,29 \pm 0,08$	5,17	-
1ª SUBDIVISION	MAXC (Zmap)	-	$2,27 \pm 0,33$	7,11	$2,3 \pm 0,1$
	MMCC (Excel)	2,3	$1,95 \pm 0,13$	6,3	-
	MAXV (Excel)		$2,30 \pm 0,27$	7,16	-
2ª SUBDIVISION	MAXC (Zmap)	-	$1,21 \pm 0,36$	4,08	$2,2 \pm 0,2$
	MAXV (Excel)	2,1	$0,99 \pm 0,19$	3,53	-
3ª SUBDIVISION	MAXC (Zmap)	-	$1,26 \pm 0,15$	4,97	$2,3 \pm 0,1$
	MAXV (Excel)	2,2	$1,24 \pm 0,10$	4,91	-
4ª SUBDIVISIÓN	MAXC (Zmap)	-	$1,93 \pm 0,00$	5,27	$2,1 \pm 0,2$
	MAXV (Excel)	2,1	$1,54 \pm 0,41$	4,37	-

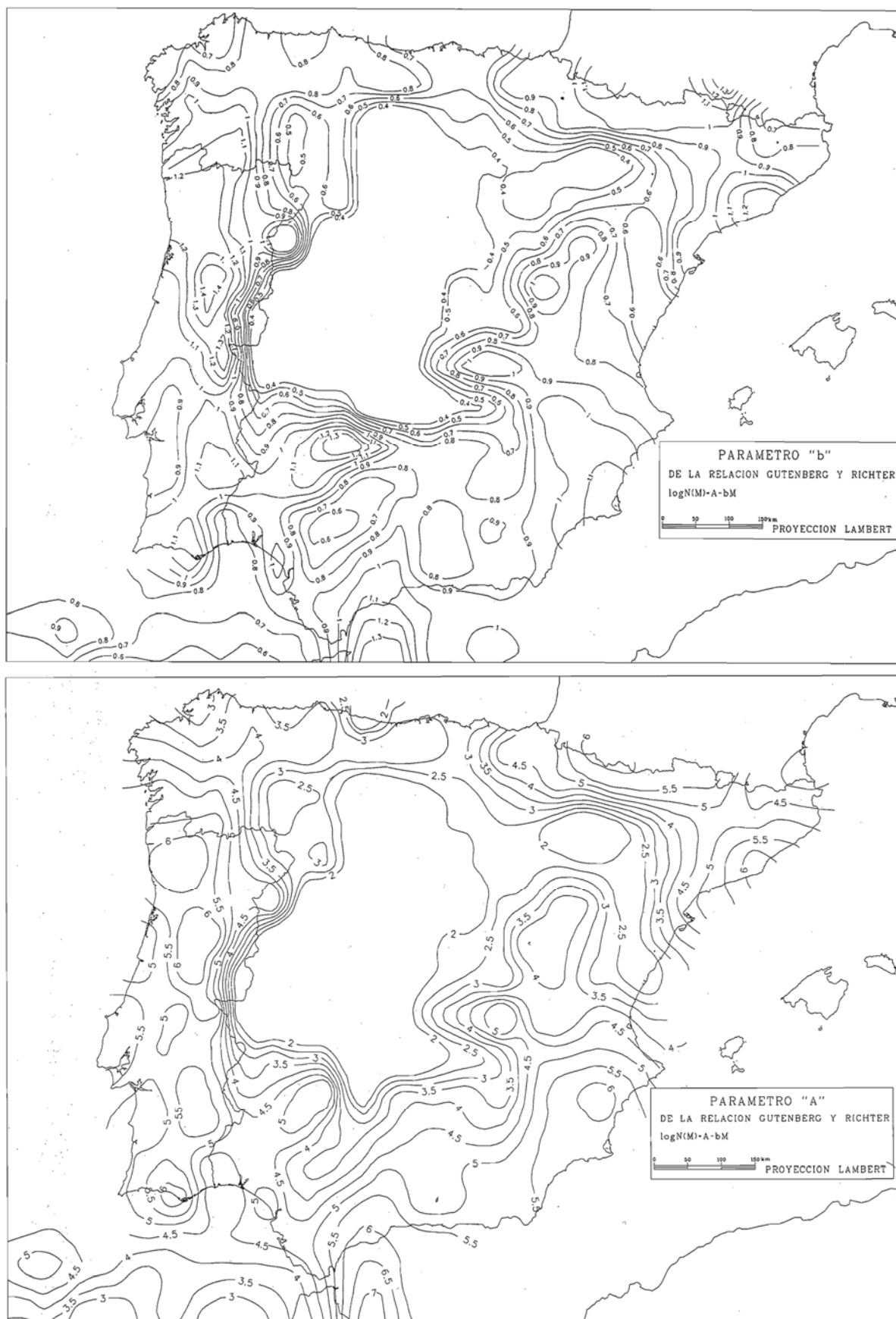


Figura 22. Mapas de distribución de los parámetros b y a de la Ley G-R. Fuente: IGN (1992).

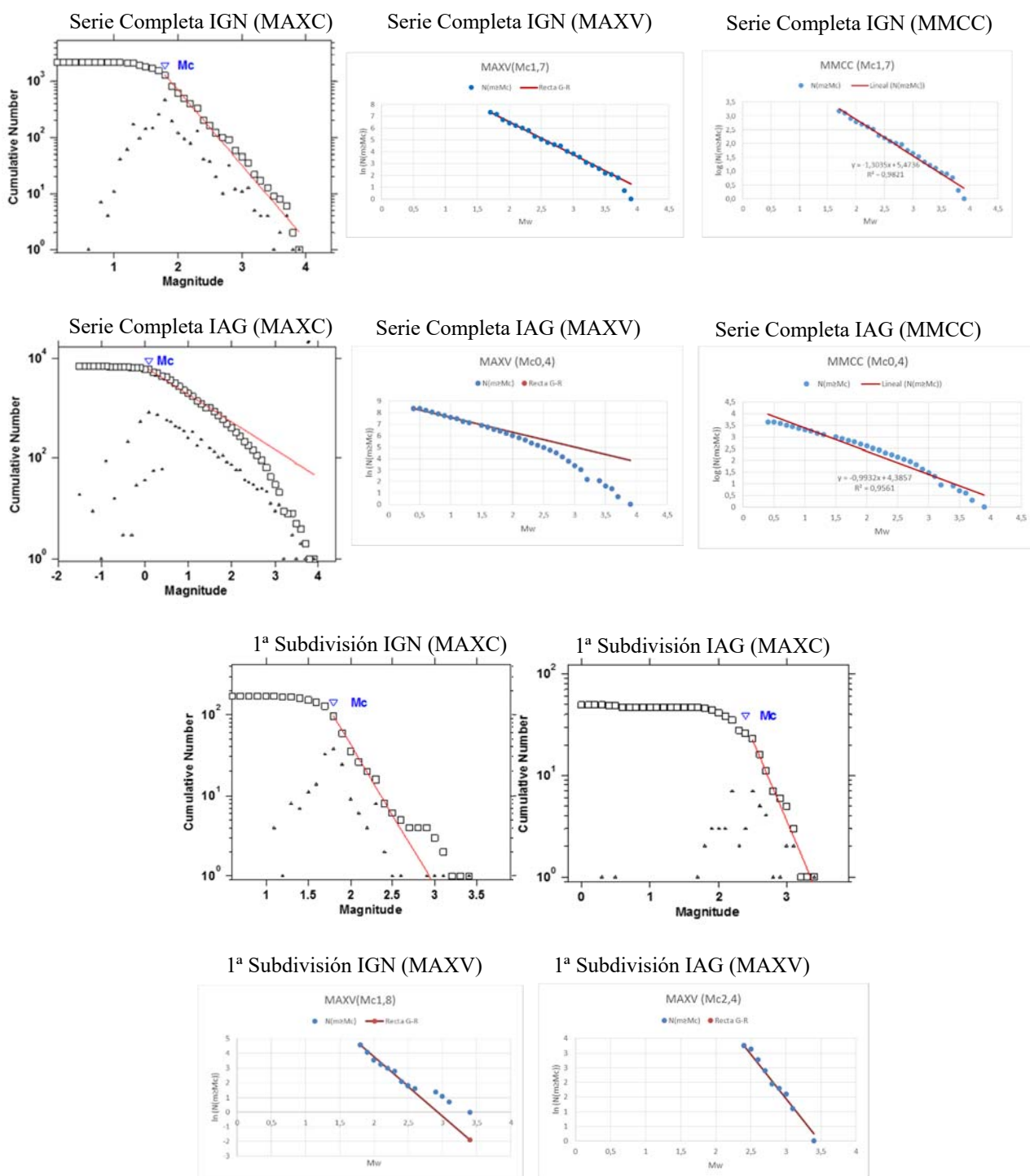


Figura 23. Comparación gráfica de los ajustes de la ley G-R para los diferentes métodos de cálculo, en la serie sísmica de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG), para la serie completa y la 1ª etapa. El eje de ordenadas está representado por el logaritmo (decimal para MAXC y MMCC y neperiano para MAXV) del número acumulado de eventos, y el de abscisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala.

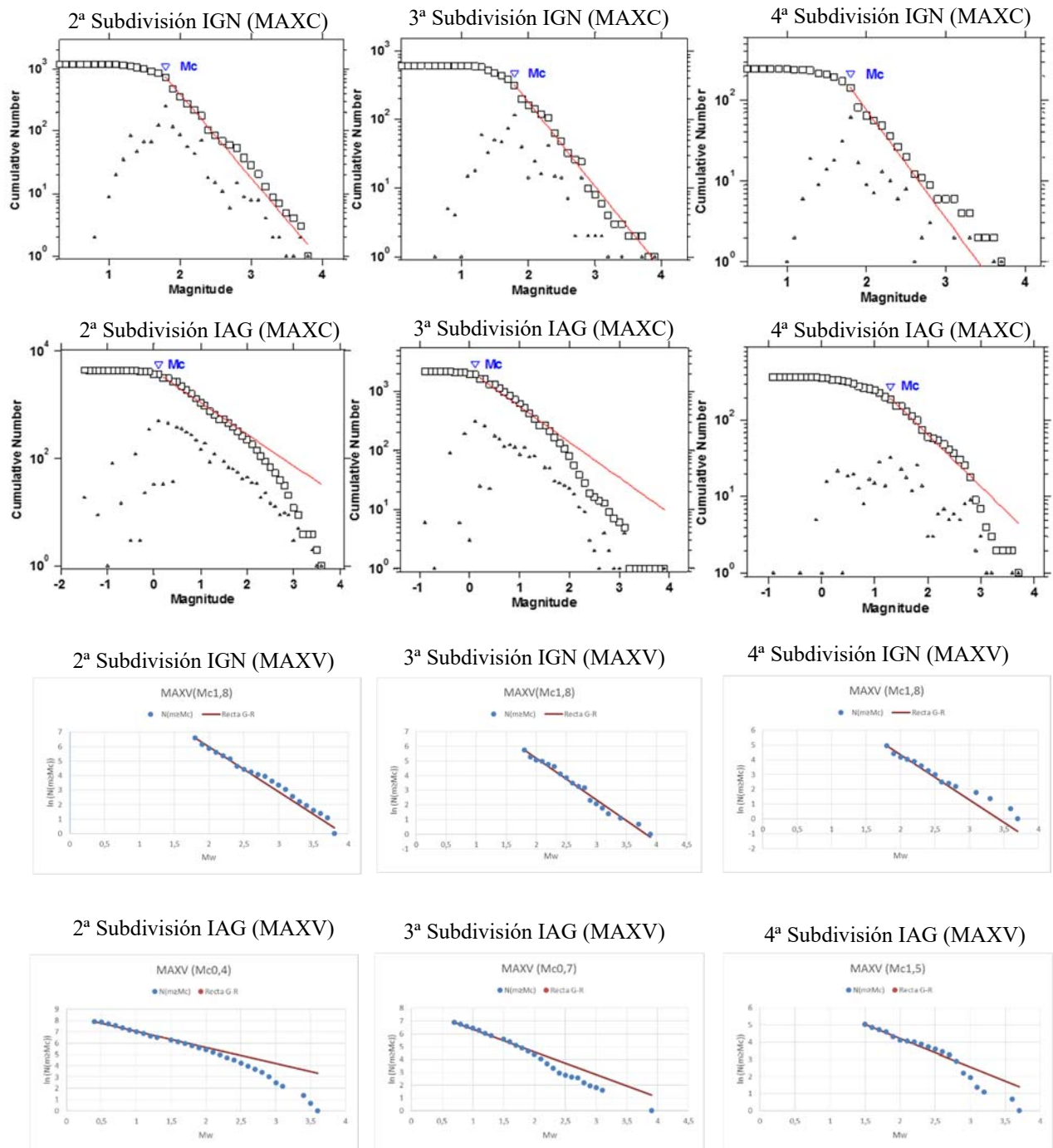


Figura 24. Comparación gráfica de los ajustes de la ley G-R para los diferentes métodos de cálculo, en las subseries sísmicas (2ª, 3ª y 4ª etapa) de Torreperogil-Sabiote (IGN e IAG). El eje de ordenadas está representado por el logaritmo (decimal para MAXC y neperiano para MAXV) del número acumulado de eventos, y el de abscisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala.

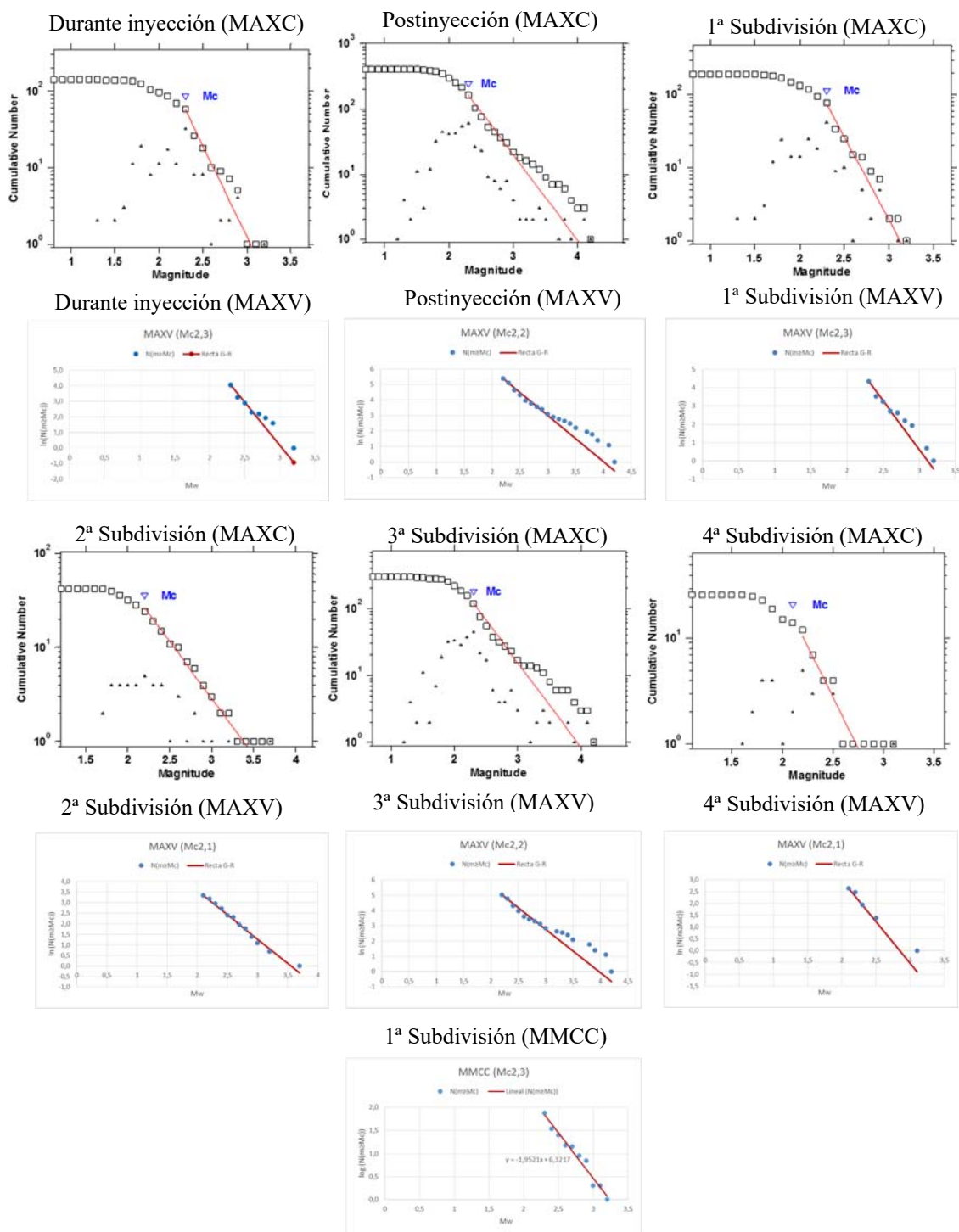


Figura 25. Comparación gráfica de los ajustes de la ley G-R para los diferentes métodos de cálculo, de la serie sísmica de Castor, en los dos tipos de divisiones: durante y postinyección, y las 4 etapas. El eje de ordenadas está representado por el logaritmo (decimal para MAXC y MMCC y neperiano para MAXV) del número acumulado de eventos, y el de abscisas por la magnitud. Gráficas con distinta escala.

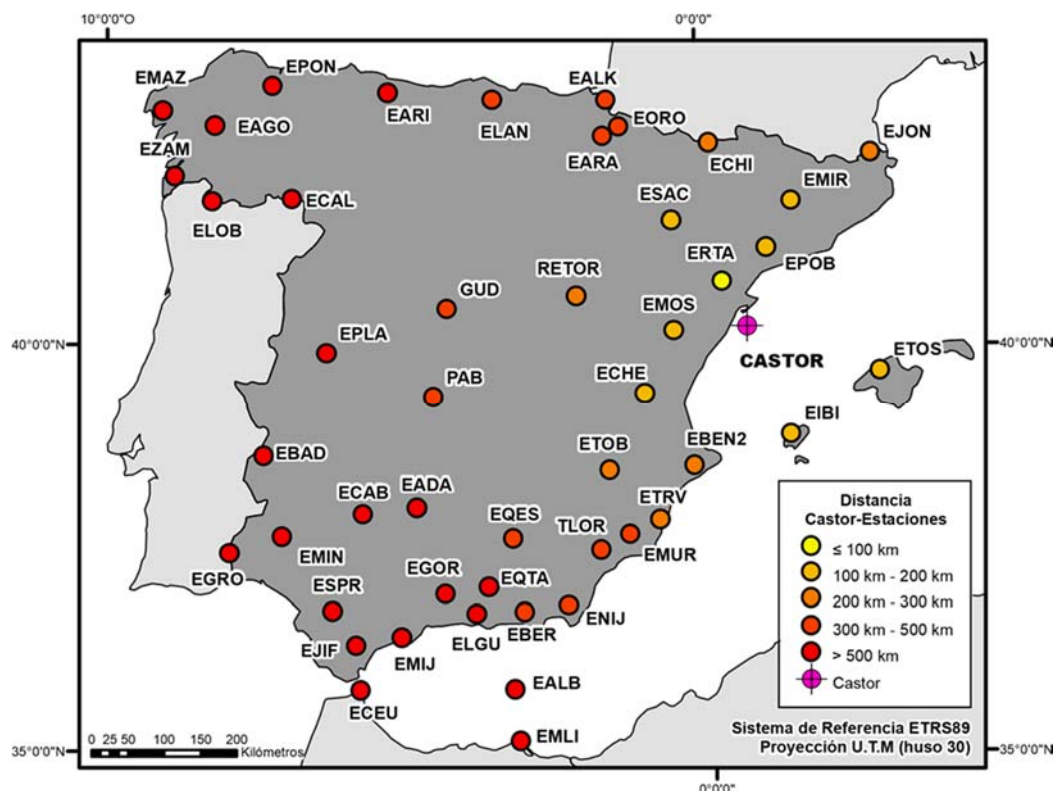


Figura 26. Localización geográfica de las estaciones sísmicas del IGN y la Plataforma Castor. La gama de colores de las estaciones sísmicas indica la distancia respecto a la plataforma marina. En el mapa aparecen indicados los nombres de las estaciones. Datos geográficos de las estaciones procedentes de la página web del IGN.

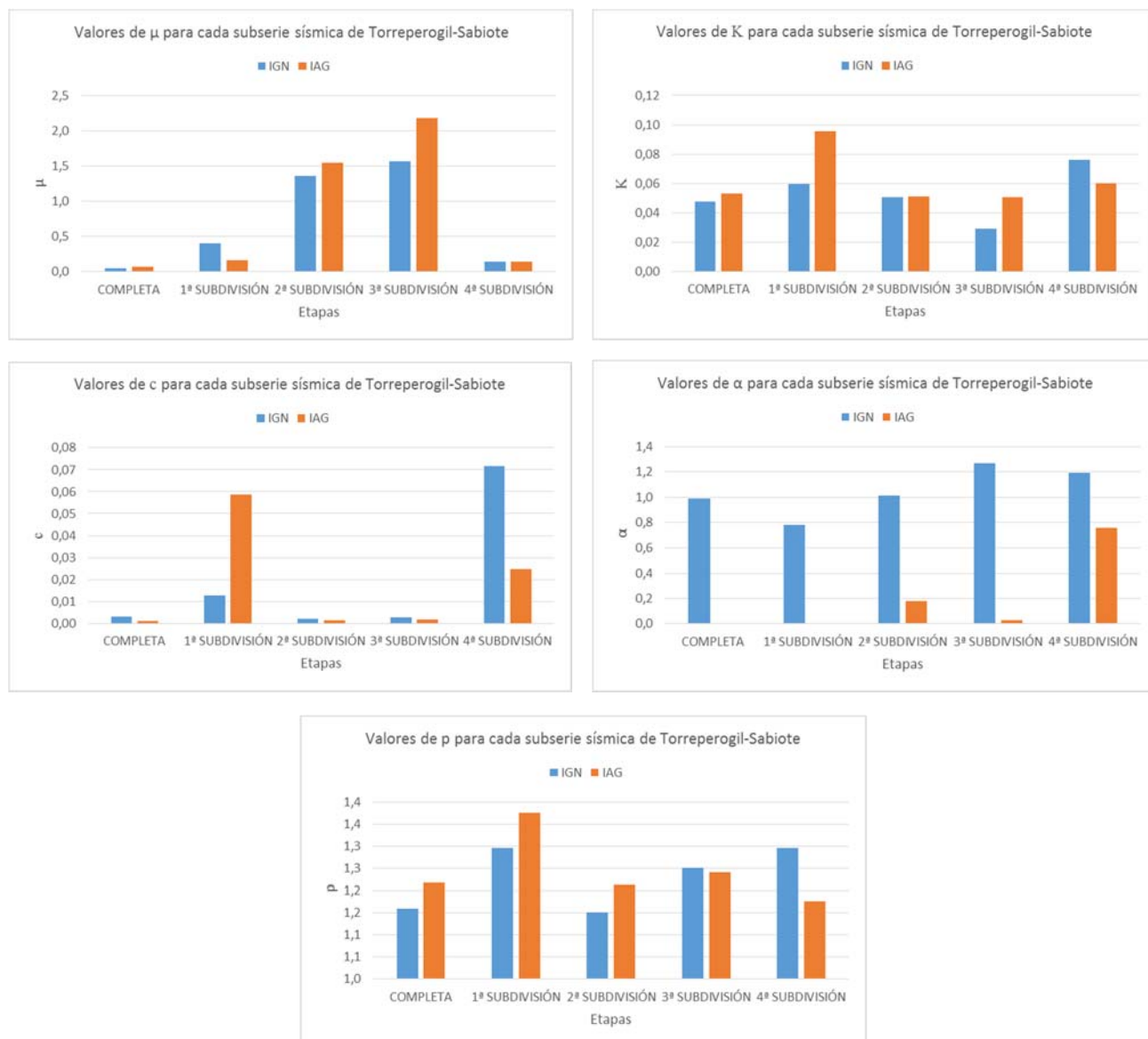


Figura 27. Histogramas de valores de los parámetros obtenidos tras el ajuste (MAXV) del modelo ETAS en las series sísmicas del IGN y del IAG de Torreperogil-Sabiote. Cálculos sin precursory.

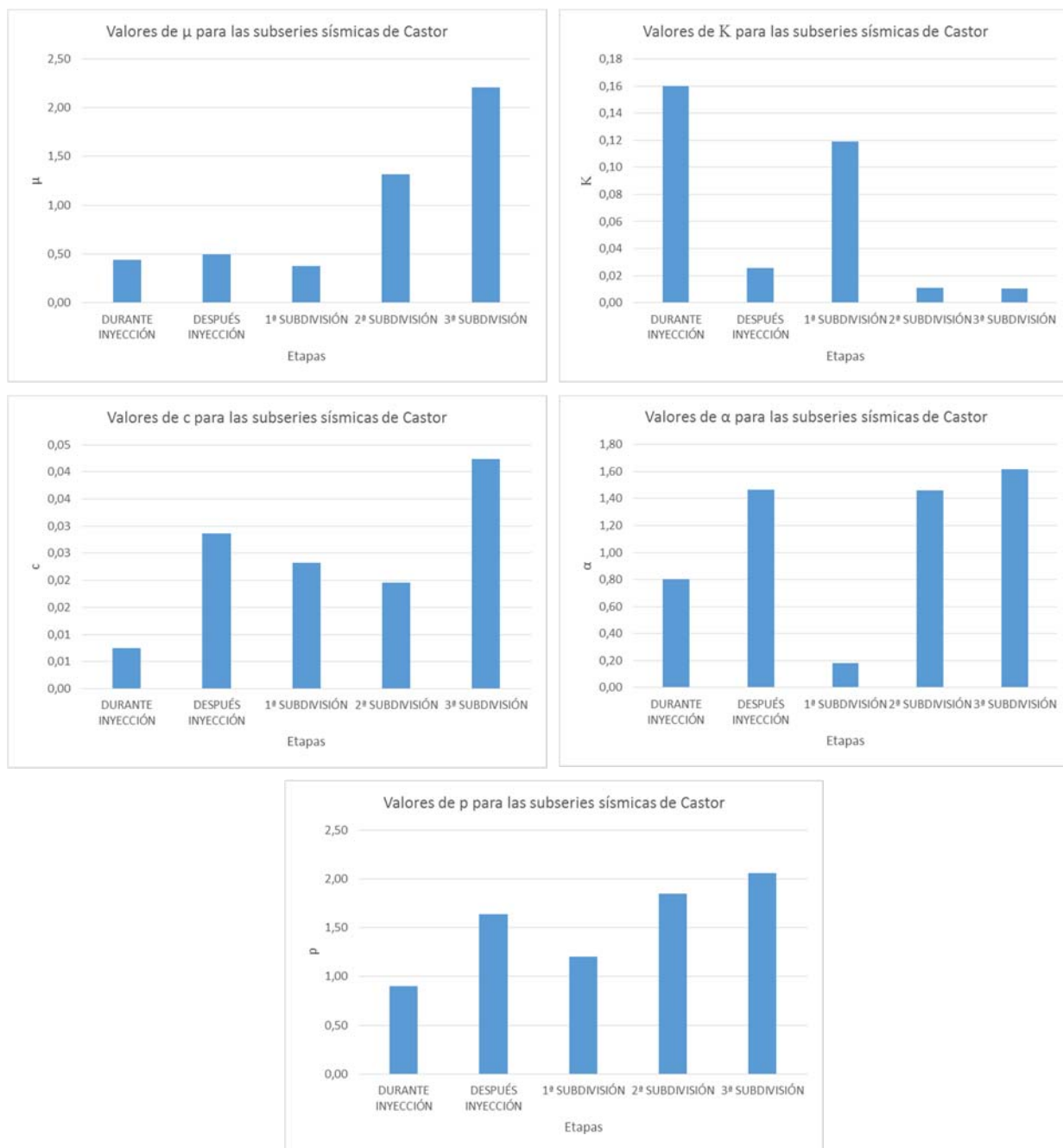


Figura 28. *Histogramas de valores de los parámetros obtenidos tras el ajuste (MAXV) del modelo ETAS en las distintas subseries de la serie sísmica de Castor. Cálculos sin precursor.*